



**João Nunes Rodrigues**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Caracterização Estática e Dinâmica de um Sensor de Forças/Momentos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Co-Orientador: Doutor António Paulo Vale Urgueira, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia

Setembro 2012



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



Caracterização estática e dinâmica de um sensor de forças/momentos.

Copyright © 2012 João Nunes Rodrigues

Faculdade de Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Dedico este trabalho ao meu Avô,  
que sempre me apoiou ao longo da minha vida  
e com quem eu gostaria de ter partilhado esta etapa.



# AGRADECIMENTOS

À minha Orientadora, Professora Doutora Raquel Almeida, pela sua total disponibilidade, motivação e interesse neste trabalho.

Ao meu Co-Orientador, Professor Doutor António Urgueira, pelos seus constantes conselhos e motivação para ultrapassar as dificuldades.

Ao meu colega Eng.º Jorge André Bernardo pelo desenvolvimento prévio do sensor.

Aos técnicos das oficinas do DEMI da FCT, Senhor António Campos e Senhor Paulo Magalhães pela ajuda prestada em diversas operações realizadas.

Aos meus colegas e amigos Diogo e Bruno pela motivação e importante ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família pelo apoio incondicional e motivação essenciais para a conclusão deste trabalho.

À Tânia pelo carinho, incentivo e apoio demonstrados não só ao longo deste trabalho como também ao longo do meu percurso académico.

Finalmente a todos os meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo ao longo dos últimos anos.





## RESUMO

Todas as estruturas estão sujeitas a diversos esforços ao longo do seu período de utilização. Estes esforços podem provir de diferentes origens, sejam elas naturais (peso e temperatura do meio envolvente) ou de funcionamento em serviço, carregamentos aplicados à estrutura. É muitas vezes necessário quantificar estes esforços aplicados.

Para caracterizar um esforço aplicado é necessário conhecer certas características tais como o ponto de aplicação, intensidade, sentido e direcção. O sensor em estudo tem como objectivo tornar possível a medição das seis componentes de um determinado carregamento (3 componentes ortogonais da força e 3 componentes ortogonais do momento), podendo este carregamento ser estático ou dinâmico. Para a determinação dos esforços pretendidos recorreu-se à utilização de extensómetros, sensores estes que permitem medir a extensão sofrida num determinado ponto devida a um determinado carregamento. Para que o referido sensor de forças/momentos desempenhe o papel esperado é crucial uma correcta calibração estática do mesmo.

Ao longo deste trabalho calcularam-se as matrizes de calibração numérica e experimental, utilizando o método dos declives e o método dos mínimos quadrados, concluiu-se a eficácia das mesmas através de ensaios de teste e analisaram-se os erros de medição resultantes de cada método, revelando valores bastante semelhantes. O método dos mínimos quadrados demonstrou uma menor complexidade e valores de erro ligeiramente inferiores. Realizou-se uma caracterização dinâmica, a qual permitiu determinar as primeiras frequências naturais do sensor e os correspondentes modos de vibração, conclui-se que o sensor apresenta uma reduzida gama de utilização em ensaios dinâmicos.

## PALAVRAS-CHAVE:

Esforços

Extensometria

Forças

Momentos

Calibração Estática

Caracterização Dinâmica



# **ABSTRACT**

All structures are subject to various loads throughout the period of use. These loads may come from different factors, whether natural (weight and temperature of the environment) or external (forces applied to the structure). It is often necessary to quantify these loads.

To characterize an applied force is necessary to know certain characteristics such as the point of application, intensity and direction. The sensor was designed to measure the six orthogonal components of a particular load, static or dynamic (three force components and three moment components). Strain gages were used to determine the desired efforts, these sensors measures the extension experienced at a certain point due to an applied load. A proper calibration, static and dynamic, of the sensor is crucial for a correct measure. Thus, throughout this paper will present the methodologies used to make this goal possible. To prove the correct functioning of the sensor will be perform numerous test trials.

Throughout this work a theoretical and experimental matrices were calculated, using the slope method and least square method. It was concluded their effectiveness with trial tests. The least square method showed slightly lower measurement errors and definitely less complexity. It was performed a dynamic characterization, which allowed to determine the first natural frequencies of the sensor and corresponding mode shapes. It was concluded the reduced range of use of this sensor in dynamic tests.

## **KEY-WORDS:**

Loads

Extensometry

Strain gages

Forces

Moments

Static Calibration

Dynamic Characterization



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	ix
Palavras-chave: .....	ix
Abstract.....	xi
Key-words: .....	xi
Índice Figuras .....	xvii
Índice de Tabelas .....	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Estado de Arte .....	2
1.2.1. Aplicação dos sensores de força e momentos .....	2
1.2.2. Diversos tipos de sensores existentes .....	3
1.2.3. Estudo Bibliográfico .....	5
2. Enquadramento Teórico .....	11
2.1. Extensometria.....	11
2.1.1. Introdução .....	11
2.1.2. Extensómetros.....	12
2.1.3. Características do Extensómetro .....	13
2.1.4. Fontes de erro nos extensómetros .....	15
2.1.5. Ponte de <i>Wheatstone</i> .....	16
2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	17
2.2.1. Passos para a utilização do MEF .....	18
2.2.2. Limitações do MEF .....	18
3. Sensor Utilizado .....	19
3.1. Características do sensor .....	19
3.1.1. Medição $F_x$ :.....	20
3.1.2. Medição $F_y$ :.....	22
3.1.3. Medições $F_z$ , $M_x$ e $M_y$ : .....	24

3.1.4.	Medição $M_z$ :	28
3.2.	Avaliação Prévia	30
3.3.	Métodos de Calibração Estática	32
3.3.1.	Método dos declives	32
3.3.2.	Método dos mínimos quadrados	32
4.	Calibração Utilizando modelo numérico	35
4.1.	Modelação Teórica	35
4.2.	Definição da malha	35
4.3.	Condições de Fronteira	37
4.4.	Simulações	37
4.4.1.	Força x:	37
4.4.2.	Força y:	40
4.4.3.	Força z:	42
4.4.4.	Momento x:	43
4.4.5.	Momento y:	45
4.4.6.	Momento z:	46
4.5.	Determinação do valor das extensões teóricas	48
4.6.	Cálculo da Matriz de Calibração Teórica	51
4.6.1.	Método dos declives	51
4.6.2.	Método dos Mínimos Quadrados	53
4.7.	Validação da matriz de calibração	54
4.7.1.	Esforços Aplicados	54
4.7.2.	Ensaio de aplicação de força	54
4.7.3.	Ensaio de aplicação de momento	56
4.7.4.	Ensaio de forças e momentos combinados	57
4.7.5.	Análise de Erros	59
5.	Calibração Utilizando modelo experimental	61
5.1.	Sistema de aquisição de dados	61
5.2.	Programação em <i>Labview</i>	62

5.3.	Programa utilizado .....	63
5.3.1.	Painel Frontal.....	63
5.3.2.	Diagrama de Blocos.....	64
5.4.	Alterações ao sensor.....	67
5.5.	Ensaio de Calibração .....	67
5.5.1.	Procedimento dos ensaios.....	67
5.5.2.	Calibração $F_x$ .....	69
5.5.3.	Calibração $F_y$ .....	71
5.5.4.	Calibração $F_z$ .....	72
5.5.5.	Calibração $M_x$ .....	73
5.5.6.	Calibração $M_y$ .....	74
5.5.7.	Calibração $M_z$ .....	75
5.6.	Valores de Extensões.....	76
5.7.	Cálculo da Matriz de Calibração Experimental.....	76
5.7.1.	Método dos declives .....	76
5.7.2.	Método dos Mínimos Quadrados.....	81
5.8.	Validação da matriz de calibração experimental.....	83
5.8.1.	Ensaio de aplicação de forças.....	83
5.8.2.	Ensaio de aplicação de momentos.....	84
5.8.3.	Ensaio de aplicação de esforços combinados.....	86
5.8.4.	Análise de erros .....	94
6.	Caracterização Dinâmica.....	97
6.1.	Modelo Teórico .....	97
6.2.	Modelo Experimental.....	98
6.3.	Análise Comparativa .....	98
6.3.1.	1º Modo de Vibração .....	99
6.3.2.	2º Modo de Vibração .....	100
6.3.3.	3º Modo de Vibração .....	101
6.3.4.	4º Modo de Vibração .....	102

6.3.5. 5° Modo de Vibração .....	103
7. Conclusão .....	105
8. Referências Bibliográficas .....	107
AnexosI	
Anexo A.....	II
Anexo B.....	VIII
Anexo C.....	XI



# ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1 – Sensor de carga extensométrico [1] .....	2
Figura 1.2 – Sensores de força piezoelétricos [2] .....	2
Figura 1.3 – Sensores “ <i>Force Plate</i> ” e “ <i>Force Base</i> ” da AMTI [3] .....	4
Figura 1.4 – Diagrama de Forças/Momentos medidos por o sensor [3] .....	4
Figura 1.5 – Sistema de aquisição de sinal de um sensor [3] .....	4
Figura 1.6 – Curvas dos testes de calibração para os vários ensaios efectuados [4] .....	6
Figura 1.7 – Erros de interferência dos testes de calibração [4] .....	6
Figura 1.8 – Estrutura do sensor desenvolvido [6] .....	6
Figura 1.9 – Valores obtidos na simulação de aplicação de esforços [6] .....	7
Figura 1.10 – Estrutura do sensor multi-eixos [7] .....	7
Figura 1.11 – Erros de interferência do sensor [7] .....	8
Figura 1.12 – Matriz de calibração experimental [9] .....	8
Figura 1.13 – Sensor multi-eixos [12] .....	8
Figura 1.14 – Matriz de calibração experimental [12] .....	9
Figura 1.15 – Estrutura do sensor e erros de interferência [15] .....	9
Figura 1.16 – Estrutura do sensor e erros de interferência [16] .....	9
Figura 2.1 – Alongamento devido à aplicação de uma força [17] .....	12
Figura 2.2 – Parcela de um fio metálico do extensómetro [17] .....	12
Figura 2.3 – Extensómetro metálico [18] .....	13
Figura 2.4 – Exemplo de código do extensómetro[19] .....	13
Figura 2.5 – Variação do factor de sensibilidade com a temperatura [19] .....	15
Figura 3.1 – Sensor utilizado e modelação do mesmo em <i>Solidworks</i> .....	19
Figura 3.2 – Pormenor do 1º andar do sensor .....	20
Figura 3.3 – Esquema da disposição dos extensómetros no 1º andar do sensor .....	21
Figura 3.4 – Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina (Esq.) e Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_x$ (Dir.) .....	21
Figura 3.5 – Pormenor do 2º andar do sensor .....	22
Figura 3.6 – Esquema da disposição dos extensómetros no 2º andar do sensor .....	22
Figura 3.7 – Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina (Esq.) e Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_y$ (Dir.) .....	23
Figura 3.8 – Pormenor do 3º andar do sensor (vista cortada) .....	24
Figura 3.9 – Esquema da disposição dos extensómetros no 3º andar do sensor .....	25
Figura 3.10 - Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando $F_z$ .....	25

Figura 3.11 – Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_z$ .....	26
Figura 3.12 – Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando $M_x$ .....	26
Figura 3.13 – Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_x$ .....	27
Figura 3.14 – Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando $M_y$ .....	27
Figura 3.15 – Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_y$ .....	28
Figura 3.16 – Pormenor do último andar do sensor .....	28
Figura 3.17 – Esquema da disposição dos extensómetros no último andar do sensor .....	29
Figura 3.18 - Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando $M_z$ .....	29
Figura 3.19 – Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_z$ .....	30
Figura 3.20 – Novo esquema de disposição dos extensómetros (Esq.) nova Ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_x$ (Dir.) .....	31
Figura 3.21 – Alterações na disposição dos extensómetros (Esq.), novo esquema de disposição (Dir.).....	31
Figura 3.22 – Nova ponte extensométrica da componente $F_z$ .....	31
Figura 4.1 – Duas vistas do sensor modelado em <i>Solidworks</i> .....	35
Figura 4.2 – Malha definida .....	36
Figura 4.3 – Detalhe da malha refinada nas células 1ºandar (Esq.) Último andar (Dir.) .....	36
Figura 4.4 – Encastramento da base do sensor.....	37
Figura 4.5 – Aplicação da força $F_x$ .....	38
Figura 4.6 – Deslocamento eixo x do sensor ao aplicar $F_x$ (deformação não à escala) .....	38
Figura 4.7 – Extensões (eixo z) provocadas por $F_x$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.) .....	39
Figura 4.8 – Aplicação da força $F_y$ .....	40
Figura 4.9 – Deslocamento eixo y do sensor ao aplicar $F_y$ (deformação não à escala) .....	40
Figura 4.10 – Extensões (eixo z) provocadas por $F_y$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.).....	41
Figura 4.11 – Aplicação da força $F_z$ .....	42
Figura 4.12 – Deslocamento eixo z do sensor ao aplicar $F_z$ (deformação não à escala) .....	42
Figura 4.13 – Extensões (eixo y) provocadas por $F_z$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.).....	43
Figura 4.14 – Aplicação do Momento x.....	43
Figura 4.15 – Deslocamento do sensor ao aplicar $M_x$ (deformação não à escala).....	44
Figura 4.16 – Extensões (eixo y) provocadas por $M_x$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.).....	44
Figura 4.17 – Aplicação do Momento y.....	45
Figura 4.18 – Deslocamento do sensor ao aplicar $M_y$ (deformação não à escala).....	45

Figura 4.19 – Extensões (eixo x) provocadas por $M_y$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.).....	46
Figura 4.20 – Aplicação do Momento z.....	46
Figura 4.21 – Deslocamento do sensor ao aplicar $M_z$ (deformação não à escala).....	47
Figura 4.22 – Extensões (eixo z) provocadas por $M_z$ vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.).....	47
Figura 4.23 – Determinação da extensão de uma das lâminas da componente $F_x$ quando aplicado um esforço na componente $F_y$ .....	48
Figura 4.24 – Determinação da extensão de uma das lâminas da componente $M_y$ quando aplicado um esforço na mesma componente.....	48
Figura 4.25 – Cálculo da extensão total de uma componente recorrendo à ponte extensométrica .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 4.26 – Cálculo da extensão total de uma componente recorrendo à ponte extensométrica .....	50
Figura 4.27 – Ensaio $F_y$ .....	54
Figura 4.28 – Ensaio $M_x$ .....	56
Figura 4.29 – Ensaio $F_x + M_y$ (Esquerda) e $F_x, M_y$ (Direita) .....	57
Figura 4.30 – Ensaio $F_y, M_x$ (Esquerda) e $F_z, M_x, M_y$ (Direita).....	58
Figura 4.31 – Ensaio $F_x, M_z$ (Esquerda) e $F_y, M_z$ (Direita).....	58
Figura 4.32 – Gráfico comparativo dos valores dos erros para os métodos de calibração utilizados .....	60
Figura 5.1 - Chassis NI SCXI 1000 e placa NI SCXI-1314.....	61
Figura 5.2 – Pannel frontal do programa utilizado.....	63
Figura 5.3 – Secção 1 do Diagrama de Blocos.....	64
Figura 5.4 – Secção 2 do Diagrama de Blocos.....	65
Figura 5.5 – Secção 3 do Diagrama de Blocos.....	66
Figura 5.6 – Sistema de eixos coordenados definidos.....	67
Figura 5.7 – Modelação da montagem do ensaio $F_{x1}$ .....	69
Figura 5.8 – Modelação da montagem do ensaio $F_{x2}$ .....	70
Figura 5.9 – Modelação da montagem do ensaio $F_{x3}$ .....	70
Figura 5.10 – Modelação da montagem do ensaio $F_{y1}$ .....	71
Figura 5.11 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $F_{y1}$ .....	71
Figura 5.12 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $F_{y2}$ .....	72
Figura 5.13 – Modelação da montagem do ensaio $F_z$ .....	72
Figura 5.14 – Modelação da montagem do ensaio $M_x$ .....	73
Figura 5.15 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $M_x$ .....	73
Figura 5.16 – Modelação da montagem do ensaio $M_y$ .....	74

Figura 5.17 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $M_y$ .....	74
Figura 5.18 – Modelação da montagem do ensaio $M_z$ .....	75
Figura 5.19 – Gráfico da regressão linear do ensaio de calibração (Carga) da componente $F_{x3}$ . 77	
Figura 5.20 – Gráfico da regressão linear do ensaio de calibração (Descarga) da componente $F_{x3}$ .....	78
Figura 5.21 – Gráfico das regressões lineares das restantes componentes no ensaio de calibração $F_{x3}$ .....	78
Figura 5.22 – Gráficos de Interferências dos diferentes ensaios de calibração realizados .....	80
Figura 5.23 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, M_z$ .....	86
Figura 5.24 – Modelação da montagem do ensaio $F_y, M_x$ .....	87
Figura 5.25 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $F_y, M_x$ .....	87
Figura 5.26 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, M_z$ .....	87
Figura 5.27 – Modelação da montagem do ensaio $F_y, M_z$ .....	88
Figura 5.28 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $F_y, M_z$ .....	88
Figura 5.29 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, M_y$ – Base .....	89
Figura 5.30 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, M_y$ – Olhal .....	89
Figura 5.31 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, F_y, M_y$ – Base .....	90
Figura 5.32 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio $F_x, F_y, M_y$ – Base .....	90
Figura 5.33 – Modelação da montagem do ensaio $F_z, M_x$ .....	91
Figura 5.34 – Modelação da montagem do ensaio $F_z, M_y$ .....	91
Figura 5.35 – Modelação da montagem do ensaio $F_x, F_x$ .....	92
Figura 5.36 – Modelação da montagem do ensaio $F_y, F_y$ .....	92
Figura 5.37 – Gráfico comparativo dos valores dos erros para os métodos de calibração utilizados .....	94
Figura 5.38 - Gráfico comparativo dos valores dos erros para os métodos de calibração utilizados .....	95
Figura 5.39 – Gráfico comparativo dos valores dos erros para os métodos de calibração utilizados .....	95
Figura 6.1 – Condições de Fronteira definidas no ensaio de frequências .....	97
Figura 6.2 – Esquema exemplificativo da disposição dos acelerómetros e pontos de aplicação das forças, à esquerda no plano YOZ, à direita no plano XOZ.....	98

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Esforços aplicados na simulação em cada componente .....	49
Tabela 4.2 – Extensões calculadas em cada componente, para cada esforço aplicado .....	50
Tabela 4.3 – Declives calculados em cada componente para cada esforço aplicado .....	51
Tabela 4.4 – Interferências observadas entre as várias componentes do sensor (%) .....	52
Tabela 4.5 – Matriz <b>ecalib</b> das extensões medidas em cada ensaio de calibração realizado ....	53
Tabela 4.6 – Matriz <b>Fcalib</b> com os valores de forças e momentos aplicados nas direcções ortogonais.....	53
Tabela 4.7 – Esforços aplicados nos ensaios de teste.....	54
Tabela 4.8 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_y$ .....	55
Tabela 4.9 – Resumo das extensões e erros do ensaio $M_x$ .....	56
Tabela 4.10 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_x, M_y$ .....	57
Tabela 4.11 – Comparação de erros de medição entre os dois métodos utilizados.....	59
Tabela 5.1 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de forças (Carga).....	68
Tabela 5.2 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de forças (Descarga) .....	68
Tabela 5.3 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de momentos (Carga).....	68
Tabela 5.4 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de momentos (Descarga) .....	69
Tabela 5.5 – Extensões verificadas no ensaio $F_{x3}$ nas várias componentes de forças e momentos .....	76
Tabela 5.6 – Extensões verificadas nas lâminas da componente x da força, nos ensaios realizados.....	77
Tabela 5.7 – Resumo dos Erros de Linearidade e Histerese dos ensaios de calibração experimental.....	79
Tabela 5.8 – Matriz de declives calculados em cada componente para cada ensaio de calibração .....	79
Tabela 5.9 – Matriz <b>Fcalib</b> com os valores de forças e momentos aplicados nas direcções ortogonais.....	81
Tabela 5.10 – Matriz de força aplicada no ensaio $F_{x3}$ (carga) – 1ª coluna de <b>Fcalib</b> .....	81
Tabela 5.11 – Matriz <b>ecalib</b> das extensões medidas para cada ensaio de calibração realizado	82
Tabela 5.12 – Matriz de extensões verificadas no ensaio $F_{x3}$ (carga) – 1ª coluna de <b>ecalib</b> .....	82
Tabela 5.13 – Esforços aplicados em ensaios de força .....	83
Tabela 5.14 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_y$ (Método dos declives).....	84
Tabela 5.15 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_y$ (Método dos Mínimos Quadrados) .	84
Tabela 5.16 – Cargas aplicadas nos ensaios de teste de momentos .....	85

Tabela 5.17 - Resumo dos esforços e erros do ensaio $M_x$ (Método dos declives) .....	85
Tabela 5.18 – Resumo dos esforços e erros do ensaio $M_x$ (Método dos Mínimos Quadrados) ..	85
Tabela 5.19 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_x, M_y$ (Método dos declives) .....	93
Tabela 5.20 – Resumo das extensões e erros do ensaio $F_x, M_y$ (Método dos mínimos quadrados) .....	93
Tabela 6.1 – Primeiras frequências naturais teóricas do sensor .....	97

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Objectivos

O objectivo principal deste projecto é a Caracterização Estática e Dinâmica de um Sensor de Forças/Momentos, com o intuito de tornar possível a medição das seis componentes ortogonais de um determinado carregamento (3 componentes devidas à força mais 3 componentes devidas ao momento).

Para tornar possível este objectivo foi definida a execução das seguintes tarefas:

1) Estabelecer o estado de arte em sensores de forças/momentos, definindo as aplicações destes sensores, os vários tipos de sensores existentes e suas características.

2) Caracterizar e efectuar uma avaliação prévia ao sensor utilizado.

3) Modelação e validação teórica do sensor em *software Solidworks* de forma a determinar valores teóricos da extensão nos pontos onde se pretende fazer as medições desta grandeza, por forma a determinar a matriz de calibração teórica.

4) Calibração Estática do sensor por via experimental.

5) Realização de ensaios de teste de forma a validar experimentalmente o sensor.

6) Caracterização Dinâmica do sensor.

## 1.2. Estado de Arte

### 1.2.1. Aplicação dos sensores de força e momentos

Os sensores de carga são utilizados em ensaios experimentais em várias áreas, nomeadamente, na indústria aérea e aeroespacial, indústria automóvel, indústria de construção e ainda várias aplicações nas áreas de medicina, automação e robótica, nuclear, entre outras [1]. Com os avanços tecnológicos a nível informático ocorridos no último século, é cada vez mais fácil e rápido analisar a resposta de modelos teóricos desenvolvidos, recorrendo a *softwares* de simulação. No entanto, na grande maioria das vezes torna-se necessário verificar se os modelos teóricos desenvolvidos são suficientemente aproximados da realidade tornando-se necessário confirmar resultados através da via experimental.

Os sensores são constituídos por células de carga que podem utilizar diferentes tecnologias, as mais comuns são as células de carga com extensómetros (Figura 1.1) e com células piezoelétricas (Figura 1.2).



Figura 1.1 – Sensor de carga extensométrico [1]



Figura 1.2 – Sensores de força piezoelétricos [2]



### 1.2.2. Diversos tipos de sensores existentes

- **Sensores baseados em extensometria:**
  - **Células de carga**
    - Esforço axial
    - Tensão de corte
    - Flexão
  - **Sensores de binário**
    - Reacção (estático)
    - Veio rotativo (dinâmico)
  - **Sensor de seis componentes para robotização**
    - Sensores de pulso
    - Sensores “*base*”
    - Sensores “*plate*”
  - **Balanças aerodinâmicas (túnel de vento)**
    - Internas
    - Externas
- **Sensor multi-eixos (balanças aerodinâmicas)**

Um tipo de sensor muito utilizado é o sensor multi-eixos, que mede forças em três eixos e os momentos segundo os eixos correspondentes. Uma importante aplicação deste tipo de sensores é a utilização na área aeroespacial, nomeadamente em medições do controlo da superfície da fuselagem, testes ao trem de aterragem, estudos de ergonomia, etc. [3].

Mas a aplicação mais comum para estes dispositivos é em balanças aerodinâmicas, de que são exemplo os sensores da marca AMTI (Figura 1.3) [3].

Este tipo de sensor é utilizado em peças que vão ser ensaiadas em túneis de vento com o objectivo de medir os esforços a que a peça está sujeita quando sobre a acção do vento.

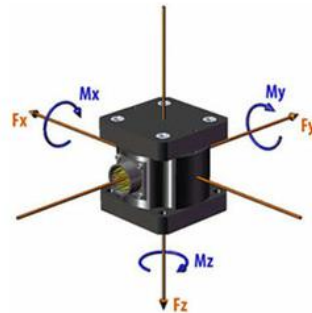
Existem dois tipos de balanças:

- **Balanças Internas:** São projectadas para serem aplicadas dentro do modelo em estudo, usualmente têm uma configuração “*sting*”, trata-se de uma viga em balanço que numa extremidade está ligada à peça a ensaiar e na outra a uma parede fixa do túnel de vento.
- **Balanças Externas:** São usadas no exterior do modelo e medem os esforços aplicados através de elementos estruturais que fazem a ligação entre o modelo e a balança.

Os esforços aplicados no topo do sensor são decompostos em seis componentes, como pode ser observado no diagrama da Figura 1.4 que mostra as componentes de força segundo as três direcções coordenadas e os correspondentes momentos, que podem ser aplicados directa ou indirectamente no sensor.



**Figura 1.3 – Sensores “Force Plate” e “Force Base” da AMTI [3]**



**Figura 1.4 – Diagrama de Forças/Momentos medidos por o sensor [3]**

A maioria dos sensores utiliza extensómetros para tornar possível a determinação dos esforços aplicados, para tal vários elementos do sensor são instrumentados com extensómetros, que são excitados com uma voltagem constante proveniente de uma fonte de alimentação [3].

Os extensómetros estão ligados a um sistema de aquisição de sinal como podemos observar na Figura 1.5.



**Figura 1.5 – Sistema de aquisição de sinal de um sensor [3]**

### **1.2.3. Estudo Bibliográfico**

O projecto, construção e caracterização de sensores multi-eixos é um processo bastante desenvolvido, estão disponíveis vários estudos de diversos autores com as diferentes abordagens em cada fase do processo. De forma a orientar o presente trabalho, foi realizada previamente uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de obter informação sobre os vários métodos de caracterização de sensores de forças e momentos. Seguidamente descrevem-se os principais estudos que serviram de apoio para este trabalho.

No estudo de Ying-jun Li e seus colaboradores (2012) foi caracterizado um sensor piezoeléctrico multi-eixos que por apresentar tecnologia de cristais de quartzo tem a vantagem de ser muito rígido estaticamente, muito sensível e revela baixos erros de histerese e linearidade. Outra característica vantajosa é possuir uma frequência natural de cerca de 200 kHz, tornando-o especialmente adequado para ensaios dinâmicos [4]. No que toca à calibração experimental deste sensor, foram realizados testes experimentais aplicando forças e momentos puros ao longo dos diferentes eixos coordenados do sensor. O procedimento consiste em aplicar uma única componente da força ou momento ao sensor, variando a sua intensidade de um valor mínimo a um máximo e em cada aplicação registar o valor medido em cada componente do sensor. O autor representou de forma gráfica os resultados dos testes de calibração (Figura 1.6), em cada ensaio de aplicação de uma componente, o sensor apenas regista valores nessa mesma componente, isto revela o desacoplamento deste sensor. Para melhor evidenciar este facto o autor constrói uma tabela resumo que demonstra os erros de interferência em cada componente, para cada ensaio realizado (Figura 1.7) [4], [5].

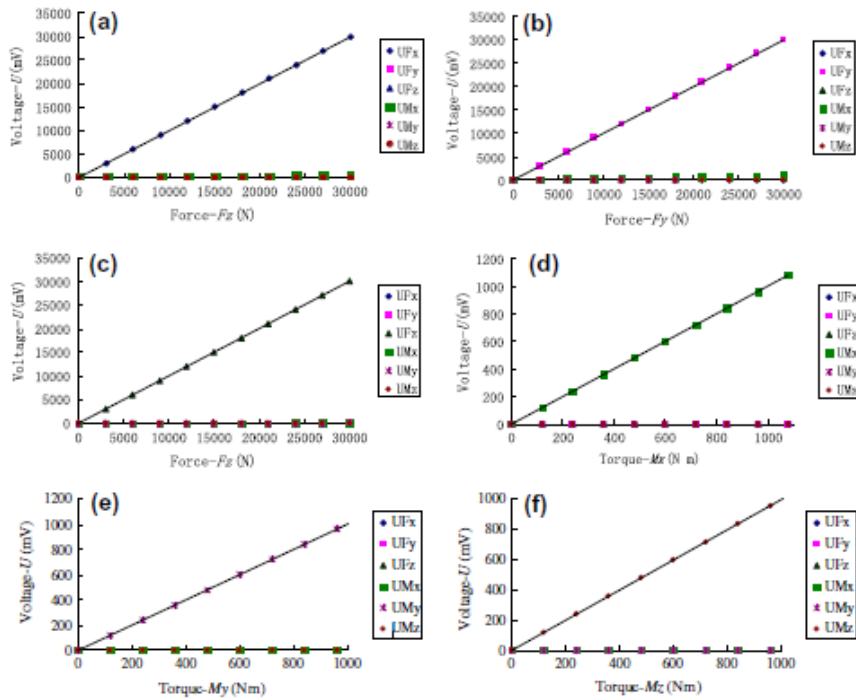


Figura 1.6 – Curvas dos testes de calibração para os vários ensaios efectuados [4]

F/M	Sensor					
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
<i>Interference error (%)</i>						
$F_x$	–	0.09	–1.76	1.26	–1.80	–0.07
$F_y$	–0.29	–	1.38	2.10	–0.49	–0.18
$F_z$	0.09	–0.03	–	0.39	0.32	0.01
$M_x$	–0.05	–0.09	–0.30	–	0.03	–0.05
$M_y$	–0.45	0.05	2.10	0.21	–	0.09
$M_z$	0.24	0.56	–0.17	0.32	–0.15	–

Figura 1.7 – Erros de interferência dos testes de calibração [4]

J.W. Joo e seus colaboradores (2002) desenvolveram um estudo onde caracterizam o seu sensor multi-eixos (Figura 1.8).

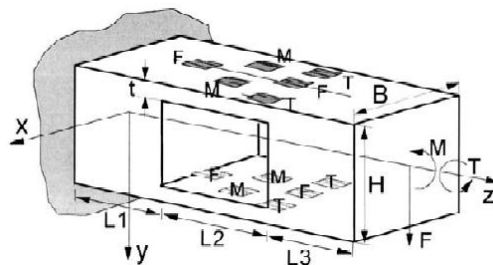


Figura 1.8 – Estrutura do sensor desenvolvido [6]

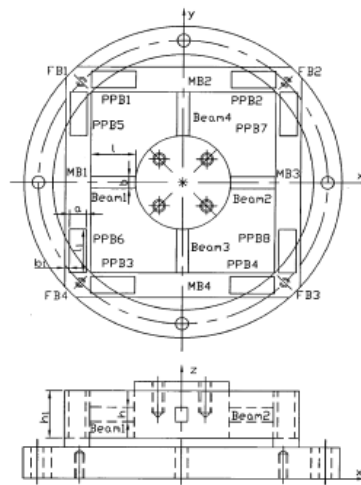
Este sensor recorre à extensometria para determinar as diferentes componentes da força e momentos aplicados à estrutura do sensor, observando-se na figura anterior a posição dos extensómetros. Para testar o acoplamento deste sensor foram simulados, recorrendo a uma técnica de elementos finitos, ensaios em cada uma das componentes da força e momentos. Os valores obtidos pelo autor estão representados na tabela da Figura 1.9, onde é possível verificar o acoplamento das componentes  $F_x / M_y$  e  $F_y / M_x$  [6].

Load	Output voltage ( $\mu V/V$ )					
	$S_{F_x}$	$S_{F_y}$	$S_{F_z}$	$S_{M_x}$	$S_{M_y}$	$S_{M_z}$
$F_x$ (196 N)	526	0	0	0	108	0
$F_y$ (196 N)	0	510	0	8	0	0
$F_z$ (196 N)	0	0	26	0	0	0
$M_x$ (19.6 N m)	0	29	0	406	0	0
$M_y$ (19.6 N m)	19	0	0	0	424	0
$M_z$ (19.6 N m)	0	0	0	0	0	436

**Figura 1.9 – Valores obtidos na simulação de aplicação de esforços [6]**

Loo afirma que a precisão de um sensor multi-eixos está fortemente dependente dos erros de acoplamento entre as várias componentes da força e momentos, assim a tecnologia para minimizar esses erros deve ser uma prioridade máxima. Ao aplicar uma componente da força ou momento, qualquer outros *outputs* do sensor devem ser tratados como interferências e eliminados através de métodos de calibração [6].

Gab-Soon Kim, no seu estudo de desenvolvimento de um sensor de forças e momentos multi-eixos para aplicação num braço robótico, afirma também a importância da estrutura do sensor ter que garantir erros de interferência de 0 %. A estrutura do seu sensor (Figura 1.10) foi planeada com esse intuito. Através de uma análise por elementos finitos foram comprovados os baixos erros de interferência (Figura 1.11) [7].



**Figura 1.10 – Estrutura do sensor multi-eixos [7]**

	Interference error(%)					
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$F_x = 200 \text{ N}$	–	0.96	0.09	0.36	–2.85	2.07
$F_y = 200 \text{ N}$	0.23	–	0.29	2.56	0.07	0.54
$F_z = 200 \text{ N}$	–1.30	0.24	–	1.82	–1.63	0.81
$M_x = 2.5 \text{ N m}$	0.09	–1.98	–0.24	–	0.06	–0.34
$M_y = 2.5 \text{ N m}$	2.07	0.61	–0.65	0.16	–	0.08
$M_z = 5.0 \text{ N m}$	–2.30	1.91	0.08	0.82	0.23	–

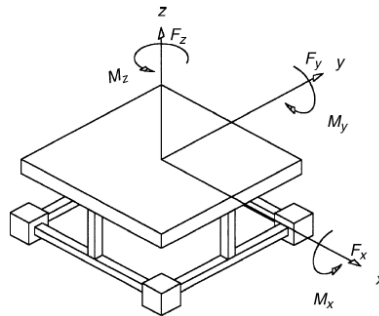
**Figura 1.11 – Erros de interferência do sensor [7]**

G. Mastinu e M. Gobbi na construção e caracterização de um sensor multi-eixos para utilização em túnel de vento, referem a importância de uma calibração estática rigorosa que permita ter em conta todos os possíveis erros de construção do sensor, tal como, tolerâncias e normalização dos constituintes, erros de perpendicularidade de peças, posição dos extensómetros, etc.[8], [9]. Realizaram dois tipos de testes estáticos, o primeiro onde aplicaram forças e momentos puros em cada um dos eixos coordenados, o segundo conjunto de testes consistiu em aplicar esforços combinados (forças e momentos simultaneamente). Utilizaram o método dos mínimos quadrados para compilar os resultados obtidos nos vários ensaios e determinar a matriz de calibração experimental (Figura 1.12) [9], [10], [11].

$$\mathbf{M}_e = 10^6 \cdot \begin{bmatrix} -0.0635 & \mathbf{1.6932} & 0.1715 & \mathbf{-0.9015} & -0.1662 & \mathbf{-0.7734} \\ \mathbf{-1.4477} & 0.0379 & \mathbf{-1.4447} & 0.0064 & \mathbf{-1.4738} & 0.0404 \\ 0.1551 & 0.0873 & -0.1332 & \mathbf{-1.4121} & -0.0928 & \mathbf{1.3094} \\ \mathbf{0.0590} & -0.0005 & \mathbf{-0.0299} & 0.0006 & \mathbf{-0.0302} & 0.0029 \\ -0.0010 & \mathbf{0.0470} & -0.0005 & \mathbf{0.0477} & -0.0011 & \mathbf{0.0494} \\ 0.0011 & -0.0013 & \mathbf{-0.0517} & 0.0020 & \mathbf{0.0520} & -0.0025 \end{bmatrix}$$

**Figura 1.12 – Matriz de calibração experimental [9]**

Sheng A. Liu, no seu estudo de caracterização de um sensor multi-eixos revela a dificuldade acrescida no método de calibração de um sensor acoplado, nomeadamente na obtenção da matriz de calibração. Recorreu ao método dos declives para obter essa matriz, aplicando em cada eixo do seu sensor (Figura 1.13) forças e momentos de valores conhecidos com várias intensidades, determinando a matriz de calibração experimental (Figura 1.14) [12].



**Figura 1.13 – Sensor multi-eixos [12]**

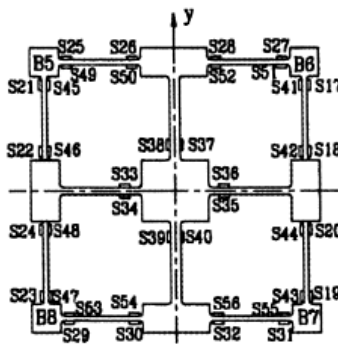
$$\vec{F} = [C]^{-1} \cdot \vec{S} = [A] \cdot \vec{S}$$

$$= \begin{bmatrix} 37890 & 0 & 0 & 0 & 6860 & 0 \\ 0 & 37890 & 0 & -6860 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 82990 & 0 & 0 & -5330 \\ 0 & 65400 & 0 & 131890 & 0 & 0 \\ -65400 & 0 & 0 & 0 & 131890 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 178030 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

**Figura 1.14 – Matriz de calibração experimental [12]**

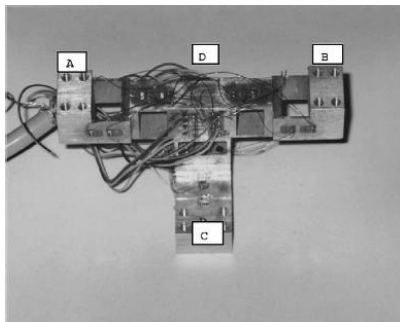
Onde [A] é a matriz de calibração, determinada pela inversa da matriz de declives [C]. Ao multiplicar a matriz de calibração pela matriz coluna dos valores de extensão [S], obtém-se a matriz de esforços aplicados [F]. A matriz de calibração elimina as interferências causadas pelo acoplamento do sensor [12], [13], [14].

Gab-Soon Kim [15] utiliza o mesmo método de calibração na caracterização do seu sensor (Figura 1.15). Assim como Joong-Jo Park [16] no seu sensor (Figura 1.16).



Sensor	Load Interference errors					
	$F_x = 100 \text{ N}$	$F_y = 100 \text{ N}$	$F_z = 100 \text{ N}$	$M_x = 1 \text{ N m}$	$M_y = 1 \text{ N m}$	$M_z = 2 \text{ N m}$
$F_x$	–	1.0	0.01	0.02	0.01	0.1
$F_y$	0.5	–	0.05	0.09	0.1	1.5
$F_z$	1.4	1.8	–	0.8	0.3	1.1
$M_x$	0.6	2.0	1.0	–	0.6	0.2
$M_y$	1.5	0.02	1.7	0.4	–	0.2
$M_z$	1.7	1.7	0.04	0.2	0.3	–

**Figura 1.15 – Estrutura do sensor e erros de interferência [15]**



F/M	Sensor					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Interference error (%)						
Fx = 50 N	–	–0.44	0.63	–0.05	–1.12	0.61
Fy = 50 N	–0.77	–	–1.51	–2.12	–0.64	2.50
Fz = 50 N	0.10	0.90	–	–0.46	1.84	0.74
Mx = 5 Nm	–0.04	1.51	1.11	–	1.03	0.74
My = 5 Nm	–0.70	–0.22	–0.48	1.76	–	1.73
Mz = 5 Nm	–0.14	–2.45	2.20	–2.67	–2.79	–

**Figura 1.16 – Estrutura do sensor e erros de interferência [16]**





## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

O presente capítulo tem como objectivo introduzir o conhecimento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho, surgindo como um prefácio das temáticas discutidas nos próximos capítulos.

### 2.1. Extensometria

#### 2.1.1. Introdução

Pode ser útil, para várias situações de projecto mais complexas, a utilização de técnicas experimentais que permitem determinar a distribuição de tensões.

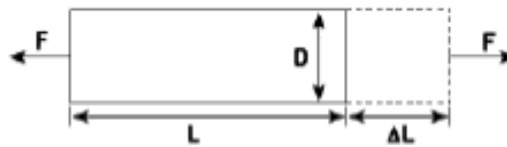
A tensão é uma grandeza que não pode ser medida directamente, no entanto é uma grandeza que pode ser relacionada com a extensão, assim, os métodos experimentais assentam na medição de extensões que são depois convertidas em valores equivalentes de tensão [17].

É necessário dispor de sensores que indiquem valores de extensão, a esses sensores dá-se o nome de extensómetros, denominação que está na origem da técnica de medição designada extensometria. No âmbito da extensometria, distinguem-se duas áreas de actividade. Por um lado a utilização de extensómetros com o propósito de obter valores fidedignos das propriedades físicas dos materiais e comparar esses valores com os obtidos pela via teórica. A outra utilização da extensometria tem como objectivo conhecer os valores de grandezas tais como: forças, momentos, pressões ou outras relacionadas com a extensão [17].

A determinação da distribuição de tensões de um componente estrutural passa pelo estudo da deformação do corpo. A deformação é um fenómeno incontornável que está presente no mundo da engenharia. Ocorre em todos os corpos que são solicitados por carregamentos exteriores ou variações de temperatura

O alongamento ( $\Delta L$ ) corresponde ao incremento ou decremento do comprimento de um corpo, quando este é sujeito a uma força que o deforma (Figura 2.1). Essa deformação pode ser relacionada com a extensão, definida pela divisão do alongamento pelo comprimento inicial (Eq.1). A extensão é portanto uma grandeza adimensional.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Eq. 1})$$



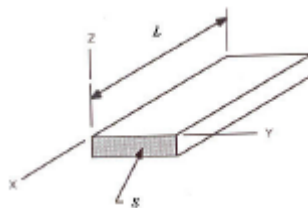
**Figura 2.1 – Alongamento devido à aplicação de uma força [17]**

Neste trabalho, o sensor construído, foi instrumentado com extensómetros para tornar possível a determinação das várias componentes das forças e momentos que actuam sobre qualquer peça que se pretenda estudar. Na próxima secção é caracterizado este dispositivo.

### 2.1.2. Extensómetros

Os extensómetros podem ser classificados como: extensómetros mecânicos, ópticos e eléctricos. O dispositivo mais comum é o extensómetro resistivo eléctrico também designado por extensómetro metálico. Este tipo de extensómetro é muito utilizado devido à facilidade de instalação e baixo custo [17].

Este dispositivo sensível à sua deformação longitudinal é colado normalmente sobre uma base de resina. O princípio básico de funcionamento deste dispositivo assenta na variação do comprimento da secção da grelha activa (Figura 2.2) [17]. Ao actuarmos a peça em estudo, na qual está colado um extensómetro, a secção transversal dos filamentos da grelha diminui e o comprimento total do fio condutor aumenta, aumentando assim a resistência do condutor. A extensão é então calculada através da variação da resistência eléctrica do extensómetro. A resistência do fio do condutor é calculada pela Eq.2:

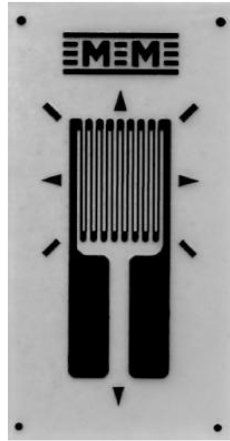


**Figura 2.2 – Parcela de um fio metálico do extensómetro [17]**

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo R - resistência (ohms);  $\rho$  - resistividade (ohms.m); L - comprimento (m) e S - área da secção transversal (m<sup>2</sup>).

O extensómetro metálico (Figura 2.3) é constituído por uma grelha fina que tem a função de maximizar a sensibilidade à deformação segundo o eixo longitudinal do extensómetro. Esta grelha aumenta a área deformável na direcção longitudinal e diminui na direcção transversal.

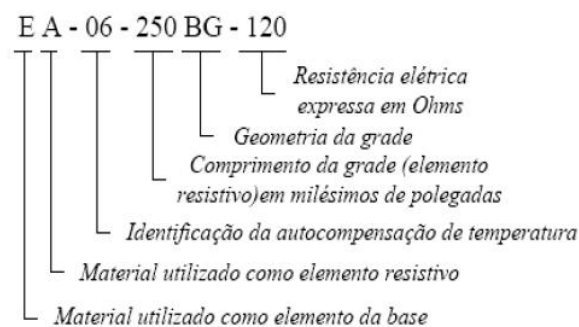


**Figura 2.3 – Extensómetro metálico [18]**

Deste modo é reduzido o efeito de Poisson, e a deformação mais significativa ocorre segundo a direcção longitudinal, esta direcção é alinhada segundo a direcção na qual se pretende medir as extensões.

### **2.1.3. Características do Extensómetro**

Cada extensómetro tem um código específico do fabricante (Figura 2.4), este código difere conforme as características próprias de cada extensómetro.



**Figura 2.4 – Exemplo de código do extensómetro[19]**

- **Resistência**

Os extensómetros mais utilizados têm resistências nominais de 120 e 350 ohms. Normalmente a escolha entre estes dois tipos de extensómetros depende da aplicação requerida, Os extensómetros de 350 ohms são ideais para ensaios dinâmicos e de vida à fadiga, apresentam uma melhor relação sinal-ruído [19].

- **Geometria**

Os extensómetros podem ser uniaxiais ou multiaxiais, a selecção entre estes dois tipos depende da utilização pretendida.

Um extensómetro uniaxial mede apenas deformações numa direcção. Uma roseta (extensómetro multiaxial) é utilizada quando é necessário determinar as tensões principais, quando são conhecidos os eixos principais utiliza-se uma roseta em T, quando não são desconhecidos utiliza-se uma roseta triangular. Utilizando uma roseta é possível determinar também o efeito de torção a que as estruturas estão sujeitas [19].

- **Factor de Sensibilidade (Gage Factor)**

O factor de sensibilidade (F) é uma grandeza adimensional, que traduz a sensibilidade do material do fio condutor do extensómetro, é definido como a variação da resistência em função da variação do comprimento pela Eq.3:

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: F – factor do extensómetro (adimensional); R – resistência do extensómetro (ohms); L – comprimento;  $\Delta R, \Delta L$  – variação de resistência e variação de comprimento (ohm, m).

Observando a equação 4, pode concluir-se que a extensão corresponde à variação de resistência unitária dividida pelo factor do extensómetro, ou seja

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{F} \quad (\text{Eq. 4})$$

A maioria dos valores do factor de sensibilidade dos extensómetros é aproximadamente 2.

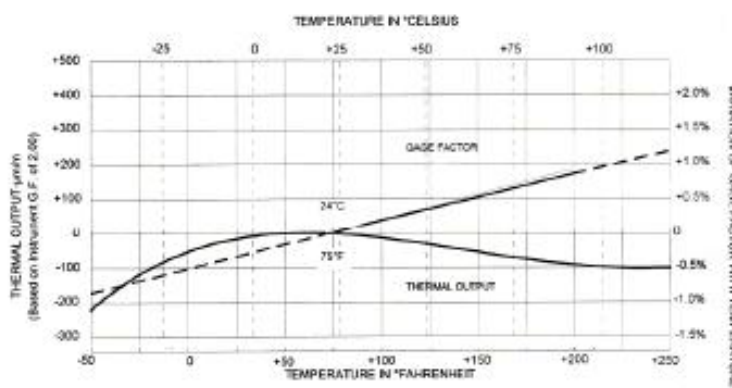
#### 2.1.4. Fontes de erro nos extensómetros

Os principais motivos de propagação de erros de leitura num extensómetro sucedem ou devido a um efeito não contabilizado da temperatura ou de uma colagem deficiente do extensómetro.

Para evitar estes erros é necessário ter em conta um determinado número de questões e procedimentos por forma a garantir que o que é medido traduz o que efectivamente se pretende.

- **Efeito da temperatura**

Este efeito ocorre quando é utilizado um extensómetro com uma grelha fabricada com um material de coeficiente de expansão linear diferente do coeficiente do material da peça a estudar. Nestes casos parte da deformação sofrida pelo extensómetro é devida exclusivamente à diferença da resposta dos dois materiais à temperatura. Com o objectivo de anular este efeito existem extensómetros termicamente autocompensados, este efeito é conseguido ao combinar o coeficiente de dilatação térmica da grelha com o do material da peça em estudo. Possibilitando que o coeficiente de resistividade dos fios condutores não se altere dentro de um certo intervalo de temperatura. Como podemos observar na Figura 2.5[19]



**Figura 2.5 – Variação do factor de sensibilidade com a temperatura [19]**

Ao aplicarmos vários extensómetros a uma peça, é possível anular o efeito da temperatura, ligando os extensómetros de uma forma específica na Ponte de *Wheatstone*, veremos essas ligações em pormenor na secção 3.1.

- **Colagem**

Se o processo de colagem não for efectuado correctamente, pode contribuir para elevados erros de leitura registados. Por forma a evitar erros de leitura devidos a colagens deficientes dos extensómetros, é necessário que a colagem destes respeite procedimentos rigorosos, dos quais se destacam os a seguir referidos:

- A escolha da cola deverá ser feita segundo especificações do fabricante, tendo em atenção o material de base do extensómetro e o material ao qual este será afixado, assim como a temperatura a que o extensómetro estará sujeito
- Antes da colagem do extensómetro é extremamente importante que seja feita a limpeza minuciosa das impurezas e rugosidade da superfície onde este vai ser colado, bem como a utilização de condicionadores e neutralizadores específicos para o material a testar. O tempo de cura da cola é também um factor muito importante.

### 2.1.5. Ponte de *Wheatstone*

Como vimos anteriormente, para calcular a extensão da peça em estudo é necessário determinar a variação da resistência dos extensómetros. O valor desta variação é um valor que advém da deformação da estrutura onde está fixado o extensómetro e esta é em geral muito pequena, sensivelmente apresenta valores na ordem da 6ª casa decimal [17]. Este facto torna impossível medir a variação da resistência com um aparelho como um ohmímetro. É portanto necessário ligar o extensómetro a um circuito eléctrico sensível a essas pequenas variações de resistência e que as converte em diferenças de potencial. Este circuito é chamado Ponte de *Wheatstone*.

A Ponte de *Wheatstone* consiste em quatro braços resistivos alimentados por uma fonte de tensão. A cada braço podem ser ligados um ou mais extensómetros. Ao ligar extensómetros em braços opostos adicionamos os valores de extensão, quando ligamos os extensómetros em braços adjacentes obtemos um efeito subtractivo de extensão [17].

A Ponte de *Wheatstone* permite, conforme a aplicação pretendida, ligar os extensómetros em diferentes posições. Podemos então medir a extensão associada à aplicação de uma força ou momento.

Como foi referido ao variar apenas a temperatura de uma estrutura (sem solicitação mecânica) a que está fixo um extensómetro, os valores de extensão medidos são provocados pelas diferenças de expansão térmica entre o material em estudo e o material do extensómetro. A Ponte de *Wheatstone* permite anular este efeito da extensão devida à variação da temperatura. O método mais utilizado é a ligação em meia ponte que pode ser feita de duas formas diferentes:

- **Extensómetro activo e passivo (*dummy*)**

Esta montagem consiste em ligar o extensómetro, afixado à peça a estudar, a um braço da ponte (extensómetro activo) e o extensómetro passivo em meia-ponte num braço adjacente. O *dummy* está colado a uma peça do mesmo material que a peça em estudo e sujeito à mesma temperatura que a peça em estudo.

Desta forma o *dummy* irá sofrer uma variação da resistência apenas devido ao efeito da temperatura, uma vez que não está a ser solicitado por qualquer esforço externo. Esta ligação anula o efeito da temperatura no valor final da extensão medido.

- **Método *push-pull***

Este método não só permite anular o efeito da temperatura como duplica a sensibilidade da ligação. Consiste na utilização de dois extensómetros activos que são ligados em meia ponte. Os extensómetros estão colados em dois pontos da estrutura sujeitos a esforços com sinal contrário. Um dos extensómetros está sujeito à tracção e outro à compressão, embora os dois estejam sujeitos aos mesmos efeitos de temperatura. Ao ligar os dois extensómetros em meia ponte, o efeito da temperatura é anulado e a sensibilidade é duplicada uma vez que estão a ser utilizados dois extensómetros activos, que medem valores de extensão iguais em módulo.

## **2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Neste trabalho ir-se-á recorrer a este método para efectuar uma modelação e validação numérica da estrutura em estudo.

O MEF consiste numa análise numérica do problema, que permite chegar a uma solução aproximada através da resolução de equações diferenciais [20].

É utilizado quando o caso em estudo é muito complexo, não sendo assim possível a utilização de métodos de análise clássicos. Isto ocorre quando estudamos problemas que não seguem comportamentos lineares, que associam vários tipos de materiais ou que têm geometrias complexas, ou seja, quase sempre que estudamos um problema real de engenharia [20].

Com os contínuos avanços tecnológicos é utilizado em cada vez mais aplicações e com grande eficiência. O método consiste em dividir um meio contínuo em várias regiões de geometria simplificada. Cada região tem o nome de elemento e cada elemento é ligado entre si por nós ou pontos nodais, ao conjunto de elementos que constituem a estrutura dá-se o nome de malha [20].

A escolha do tipo de elementos finitos a utilizar depende da estrutura em estudo. Existem elementos bidimensionais e tridimensionais, com mais ou menos nós. A escolha do tipo de elemento a utilizar não é uma escolha simples, uma vez que um elemento ideal numa estrutura poderá não o ser noutra.

Este é um método que nos leva a uma solução aproximada de um problema, assim, à medida que aumentamos o número de elementos na malha, aproximamo-nos mais da solução exacta. Mas este método tem uma particularidade, a partir de um determinado número de

elementos utilizados a solução atinge um limite de convergência. Após este ponto, aumentando o número de elementos apenas estamos a aumentar o tempo de simulação sem que a solução esteja mais próxima da exacta [20].

### **2.2.1. Passos para a utilização do MEF**

Independentemente do programa utilizado para aplicar este método, certos procedimentos são gerais [20]:

1. Dividir a estrutura em elementos finitos, gerando uma malha;
2. Especificar as propriedades de cada elemento;
3. Aplicar os esforços a que a estrutura está sujeita;
4. Especificar as condições de fronteira (apoios, encastramentos, etc.);
5. Resolver a simulação (cálculo das equações diferenciais que determinam os deslocamentos dos pontos nodais);
6. Calcular as extensões através dos deslocamentos, interpretação de resultados e exibição em forma gráfica.

### **2.2.2. Limitações do MEF**

Estes métodos têm também desvantagens inerentes a qualquer método numérico, de que são exemplo, os erros cometidos por o utilizador na definição do problema, nas suas propriedades físicas, condições de fronteira, etc. Os erros mais comuns consistem na escolha indevida do tipo de elemento e na aplicação incorrecta dos esforços aplicados à estrutura. Qualquer um destes erros compromete o estudo numérico e afasta a solução obtida da solução real do problema.



### 3. SENSOR UTILIZADO

O sensor utilizado neste trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado "Projecto e construção de um sensor destinado a medir forças/momentos em três direcções ortogonais" pelo Eng.º Jorge André Morgado Bernardo em 2011 [21].

Neste capítulo descreve-se o estudo prévio das características do sensor, o seu modo de funcionamento e as alterações efectuadas. São definidos os métodos de calibração a utilizar.

#### 3.1. Características do sensor

O sensor utilizado (Figura 3.1) é constituído por vários andares que medem diferentes componentes das forças e momentos. O sensor foi todo construído utilizando como material uma liga de alumínio de designação 6063-0 com as seguintes características:

Property	Value	Units
Elastic modulus	69000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.33	N/A
Shear modulus	25800	N/mm <sup>2</sup>
Mass density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength	90	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength in X		N/mm <sup>2</sup>
Yield strength	41.37	N/mm <sup>2</sup>
Thermal expansion coefficient	2.3e-005	/K
Thermal conductivity	218	W/(m·K)
Specific heat	900	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Seguidamente é explicado o funcionamento do sensor, recorrendo para isso a uma modelação do mesmo em *Solidworks*.

**Nota:** No modelo em *Solidworks* os extensómetros não estão representados à escala.

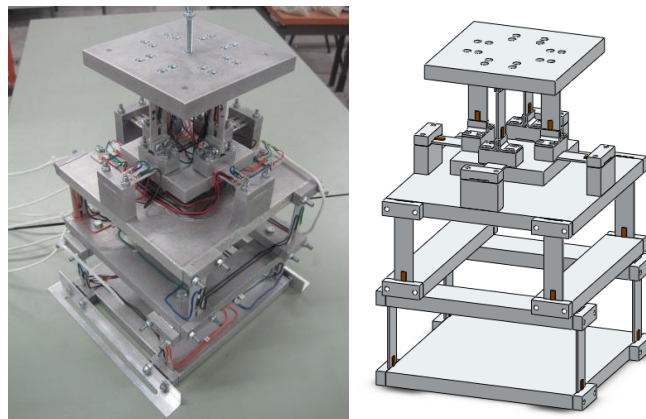
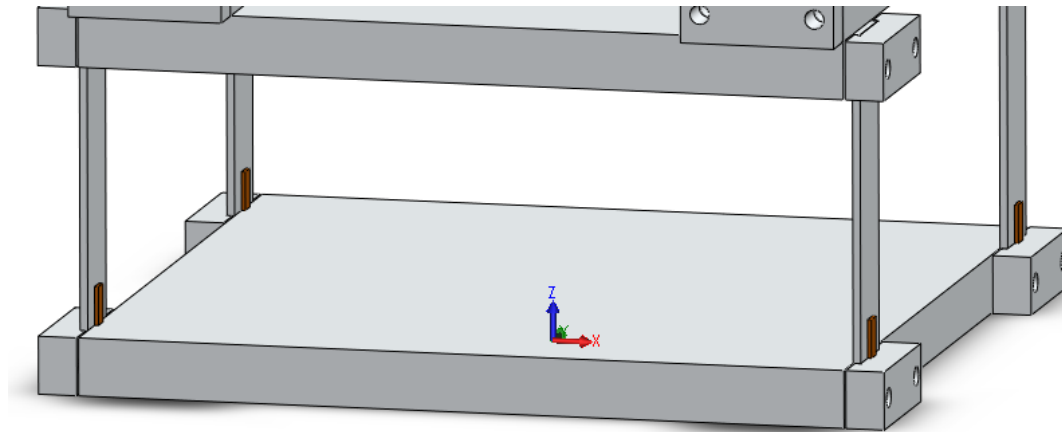


Figura 3.1 – Sensor utilizado e modelação do mesmo em *Solidworks*

### 3.1.1. Medição $F_x$ :



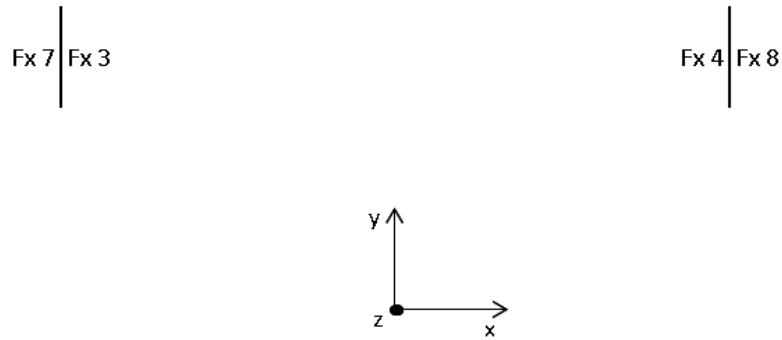
**Figura 3.2 – Pormenor do 1º andar do sensor**

O primeiro andar do sensor (Figura 3.2) mede as extensões induzidas nas células verticais, por uma força aplicada segundo o eixo X. A aplicação de uma força com componente X vai provocar a flexão das células verticais, esse efeito será sentido pelos 8 extensómetros orientados segundo a direcção Z, como se apresenta na figura 3.3. Nessas células estão colocados 8 extensómetros, dois em cada uma das quatro células.

- **Disposição dos Extensómetros**

No esquema da Figura 3.3 é possível observar a posição dos oito extensómetros em relação aos eixos coordenados do sensor.

**Nota:** cada traço vertical corresponde a uma célula, os extensómetros estão representados pela nomenclatura atribuída.

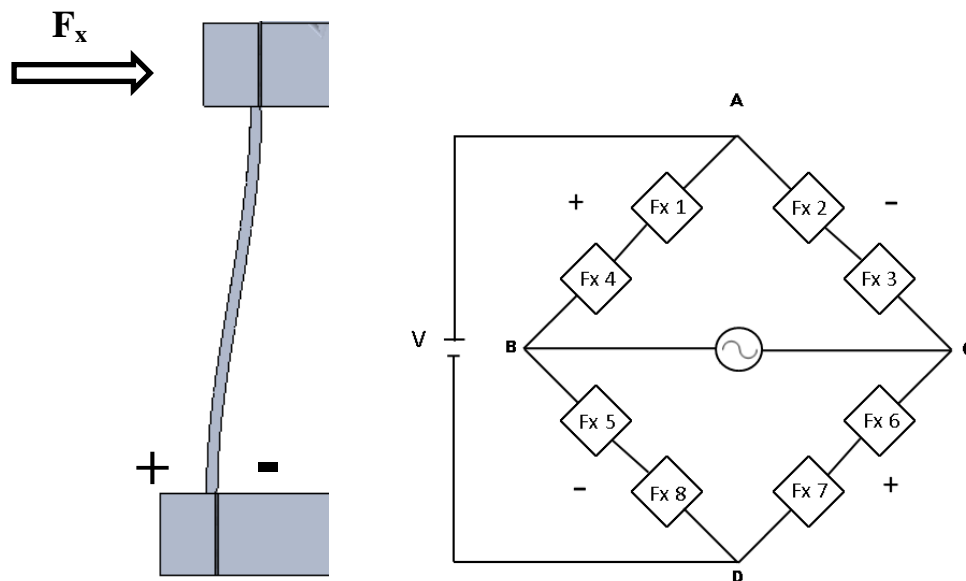


**Figura 3.3 – Esquema da disposição dos extensómetros no 1º andar do sensor**

- **Ligação na Ponte de Wheatstone**

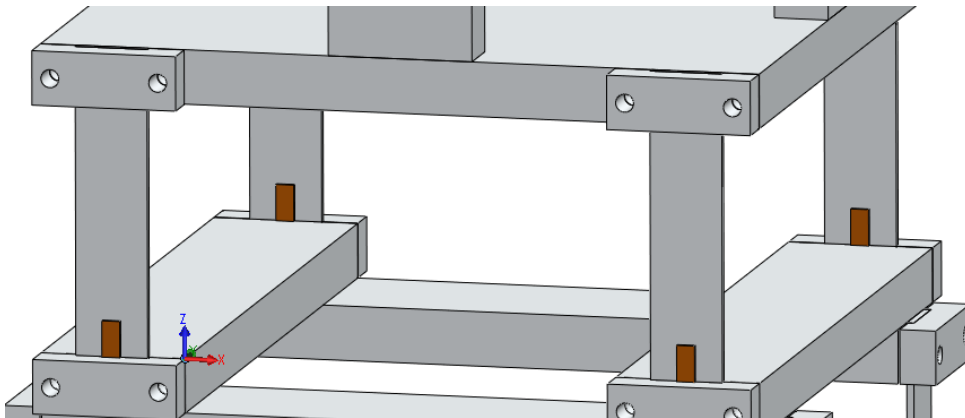
No esquema da Figura 3.4 é possível constatar o comportamento de uma lâmina do 1º andar quando o sensor é solicitado por uma força  $F_x$ .

A ligação dos extensómetros é feita conforme o esquema da Figura 3.4, tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.



**Figura 3.4 – Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina (Esq.) e Ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_x$  (Dir.)**

### 3.1.2. Medição $F_y$ :



**Figura 3.5 – Pormenor do 2º andar do sensor**

O segundo andar do sensor (Figura 3.5) mede as extensões induzidas pela aplicação de uma força segundo o eixo dos Y. Neste andar estão colocados também 8 extensómetros (dois em cada célula). Mais uma vez as extensões são medidas devido à deformação nas células que estão orientadas perpendicularmente ao eixo de medição.

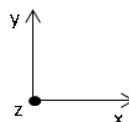
- **Disposição dos Extensómetros**

No esquema da Figura 3.6 é possível observar a posição dos oito extensómetros em relação aos eixos coordenados do sensor.

**Nota:** cada traço horizontal corresponde a uma célula, os extensómetros estão representados pela nomenclatura atribuída.

$$\frac{Fy\ 7}{Fy\ 3}$$

$$\frac{Fy\ 8}{Fy\ 4}$$



$$\frac{Fy\ 6}{Fy\ 2}$$

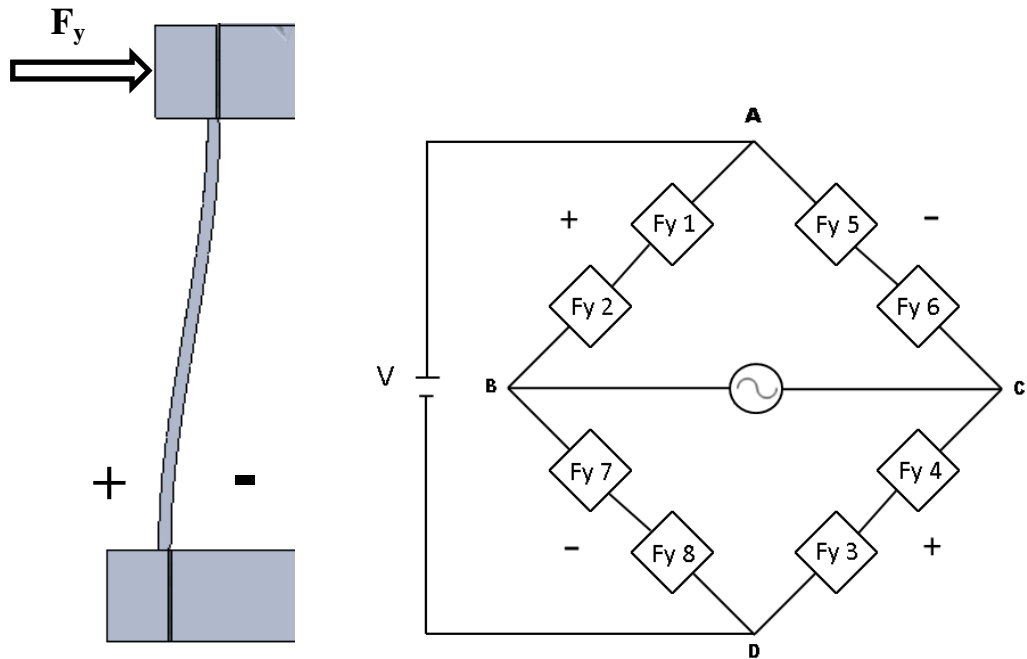
$$\frac{Fy\ 5}{Fy\ 1}$$

**Figura 3.6 – Esquema da disposição dos extensómetros no 2º andar do sensor**

- **Ligação na Ponte de Wheatstone**

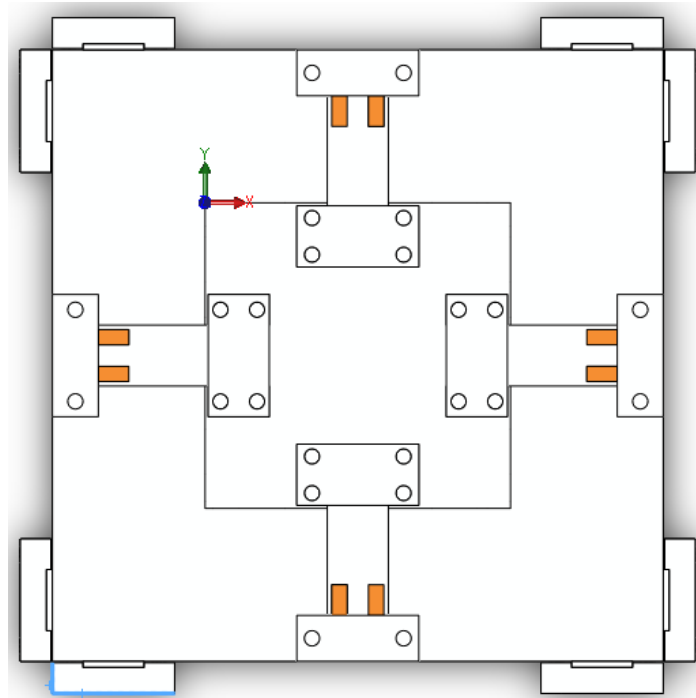
No esquema da Figura 3.7 é possível constatar o comportamento de uma lâmina do 2º andar quando o sensor é solicitado por uma força  $F_y$ .

A ligação dos extensômetros é feita conforme o esquema da Figura 3.7, tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.



**Figura 3.7 – Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina (Esq.) e Ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_y$  (Dir.)**

### 3.1.3. Medições $F_z$ , $M_x$ e $M_y$ :



**Figura 3.8 – Pormenor do 3º andar do sensor (vista cortada)**

No terceiro andar (Figura 3.8) estão colocados 16 extensómetros, 8 na parte superior de cada célula horizontal e outros 8 numa posição simétrica na parte inferior (não visível na figura).

Com esta configuração (Figura 3.9) é possível medir as forças segundo a direcção  $z$ , perpendicular à vista acima, através de quatro extensómetros na parte superior e outros quatro na parte inferior (dois em cada célula).

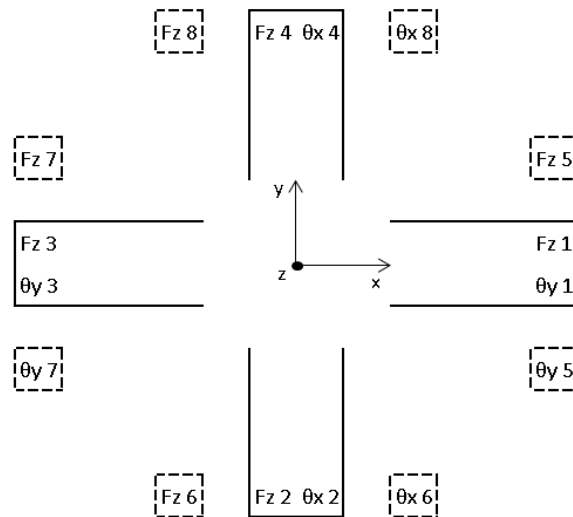
O momento segundo  $X$  é medido por 4 extensómetros colocados nas células alinhadas com o eixo  $Y$  (dois extensómetros na parte superior e dois na parte inferior) desta forma é possível quantificar rotações em torno do eixo  $X$ .

Analogamente o momento segundo o eixo  $Y$  é medido por extensómetros colocados nas células alinhadas com o eixo  $X$  também por dois extensómetros na parte superior e dois na parte inferior.

- **Disposição dos Extensômetros**

No esquema da Figura 3.9 é possível observar a posição dos extensômetros deste andar em relação aos eixos coordenados do sensor.

**Nota:** cada célula está representada no esquema, em cada célula estão colados quatro extensômetros. Dois representados na parte superior da lâmina pela nomenclatura e outros dois em quadrados tracejados que representam os extensômetros colados à parte posterior da lâmina.

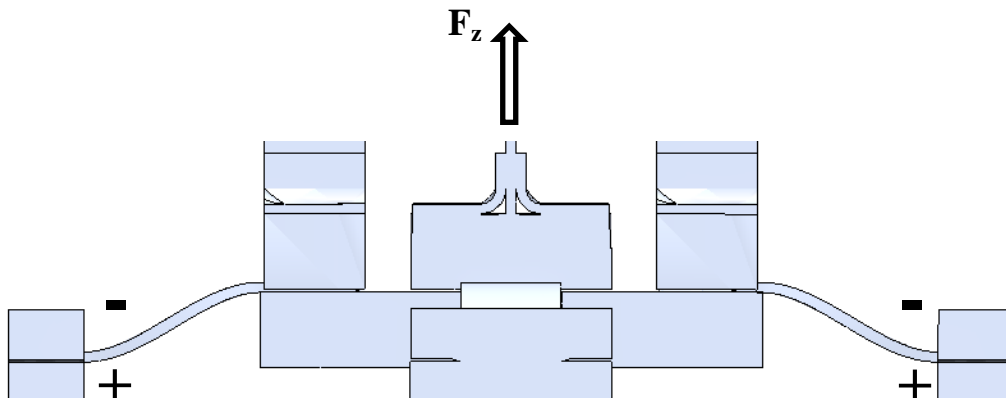


**Figura 3.9 – Esquema da disposição dos extensômetros no 3º andar do sensor**

- **Ligação na Ponte de Wheatstone  $F_z$**

No esquema da Figura 3.10 é possível constatar o comportamento das lâminas do 3º andar quando o sensor é solicitado por uma força  $F_z$ .

A ligação dos extensômetros é feita conforme o esquema da Figura 3.11 tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.



**Figura 3.10 - Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando  $F_z$**

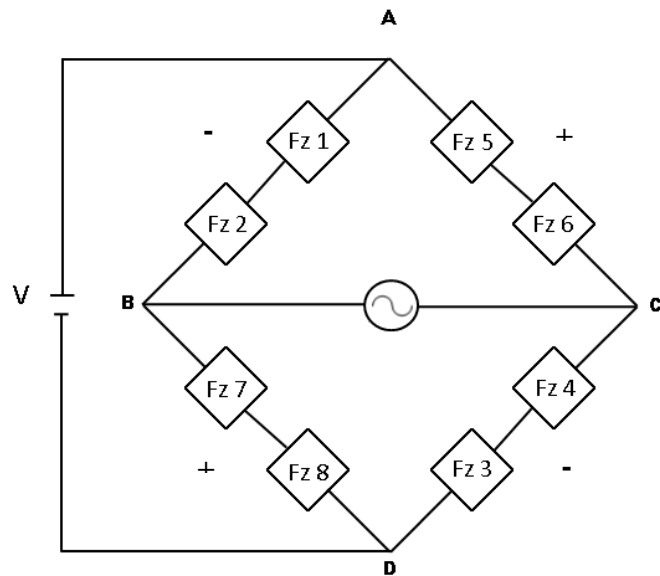


Figura 3.11 – Ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_z$

- Ligação na Ponte de *Wheatstone*  $M_x$

No esquema da Figura 3.12 é possível constatar o comportamento das lâminas do 3º andar quando é aplicado um momento  $M_x$ .

A ligação dos extensômetros é feita conforme o esquema da Figura 3.13 tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.

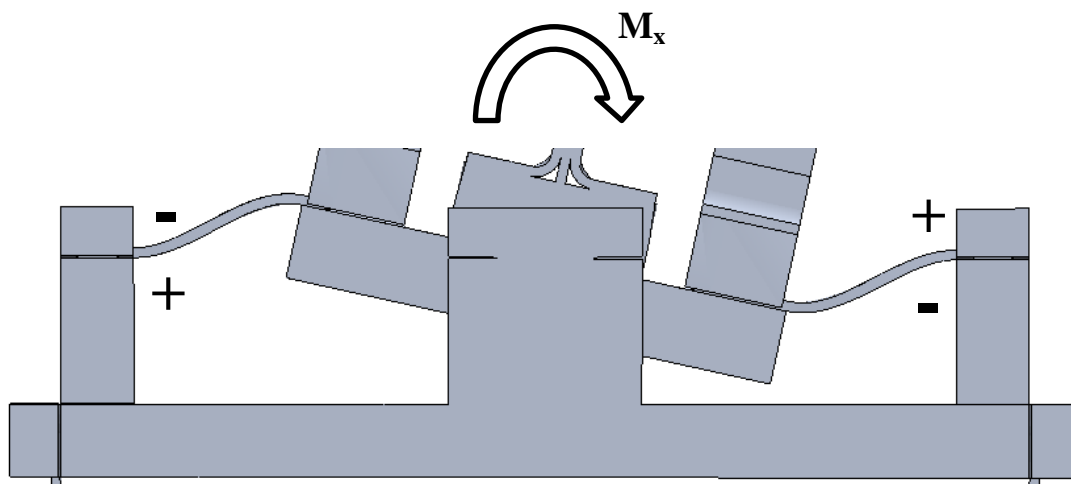


Figura 3.12 – Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando  $M_x$



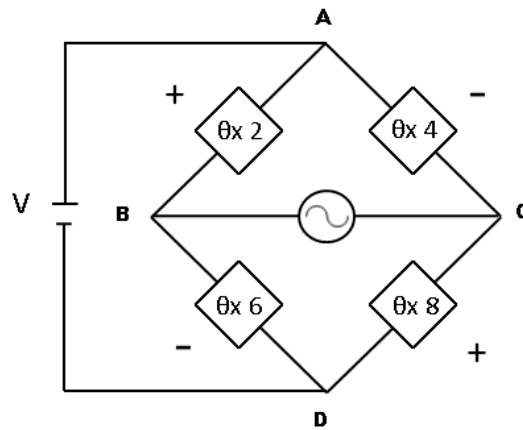


Figura 3.13 – Ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_x$

- Ligação na Ponte de *Wheatstone*  $M_y$

No esquema da Figura 3.14 é possível constatar o comportamento das lâminas do 3º andar quando é aplicado um momento  $M_y$ .

A ligação dos extensômetros é feita conforme o esquema da Figura 3.15 tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.

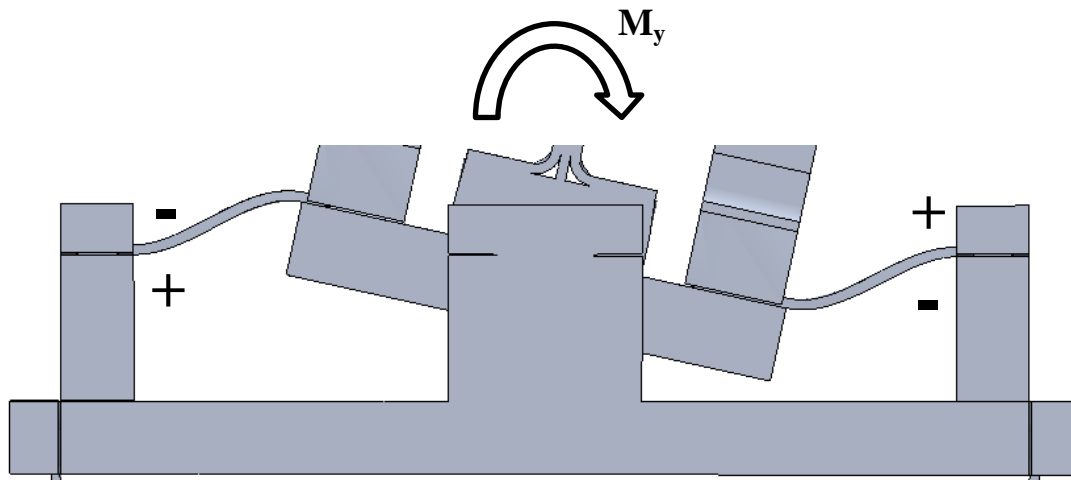


Figura 3.14 – Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando  $M_y$

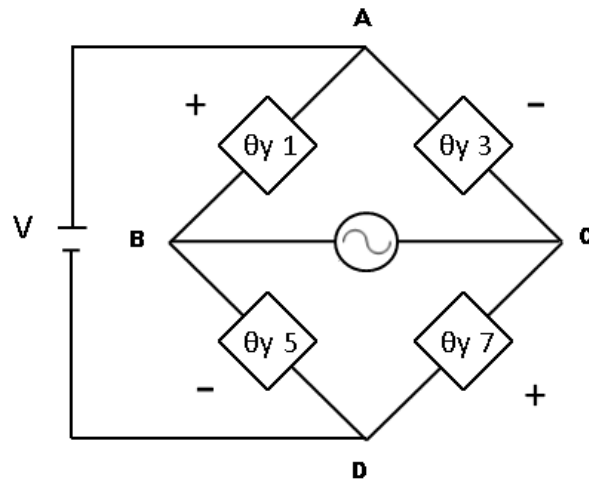


Figura 3.15 – Ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_y$

#### 3.1.4. Medição $M_z$ :

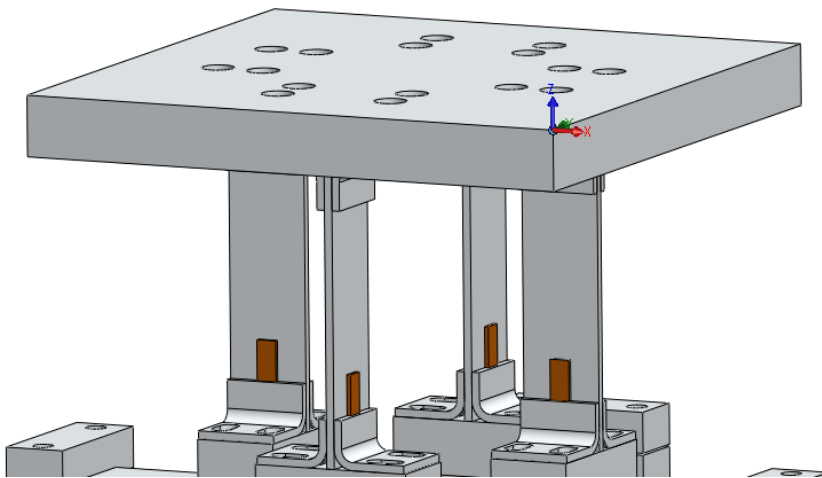


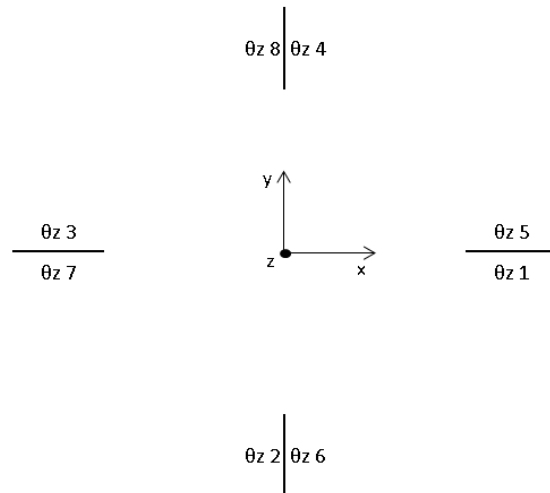
Figura 3.16 – Pormenor do último andar do sensor

No último andar (Figura 3.16) está presente uma configuração que permite, através da deformação das células verticais, medir o momento segundo o eixo Z, ou seja, o momento de torção. A medição é feita por 8 extensómetros colocados dois a dois em cada uma das quatro células.

- **Disposição dos Extensômetros**

No esquema da Figura 3.17 é possível observar a posição dos extensômetros deste andar em relação aos eixos coordenados do sensor.

**Nota:** cada célula está representada no esquema por traços verticais e horizontais, os extensômetros estão representados pela nomenclatura atribuída.

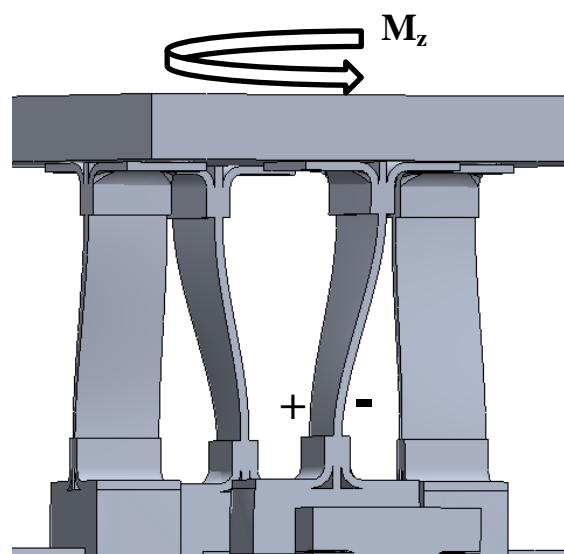


**Figura 3.17 – Esquema da disposição dos extensômetros no último andar do sensor**

- **Ligação na Ponte de Wheatstone  $F_z$**

No esquema da Figura 3.18 é possível constatar o comportamento das lâminas do 3º andar quando o sensor é solicitado por uma força  $F_z$ .

A ligação dos extensômetros é feita conforme o esquema da Figura 3.19 tendo em conta o sinal (positivo ou negativo) do valor da extensão.



**Figura 3.18 - Esquema exemplificativo do comportamento das lâminas aplicando  $M_z$**

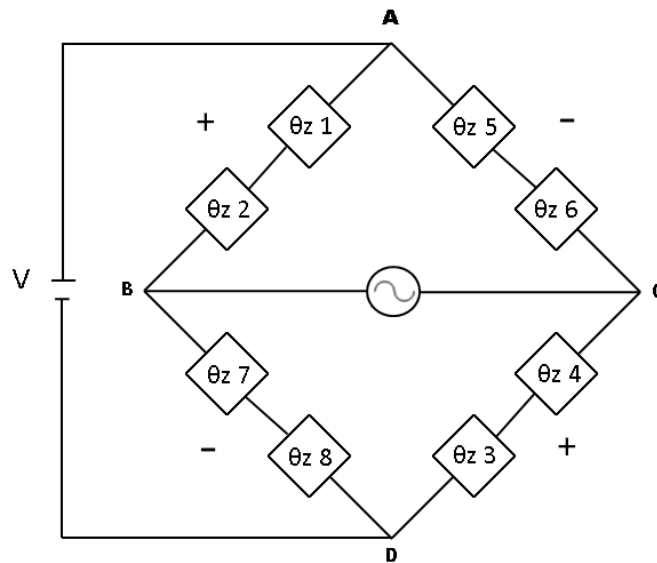


Figura 3.19 – Ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_z$

### 3.2. Avaliação Prévia

Este sensor foi construído com o intuito de medir forças e momentos que actuam em determinados objectos. Ao aplicar um esforço ao objecto em estudo, o efeito pode resultar no máximo a seis componentes, três forças nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  e em três momentos correspondentes.

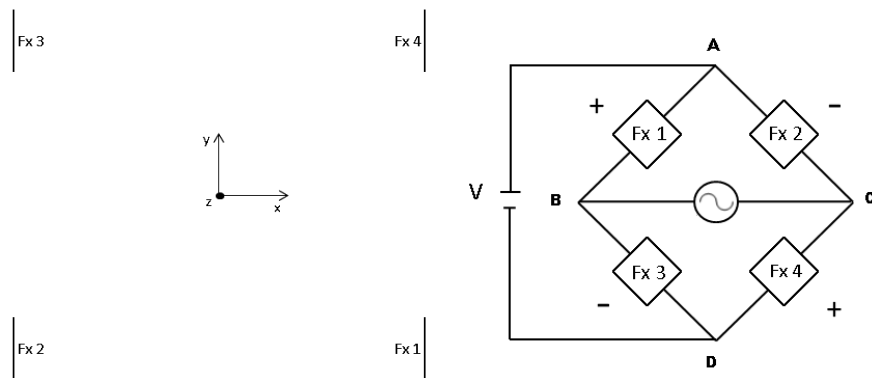
Uma das principais questões a enfrentar é a medição de cada uma das componentes do esforço separadamente. Desta forma o sistema seria desacoplado e na aplicação de uma única componente as interferências nas restantes deveria ser mínima.

Numa primeira avaliação do sensor, deparou-se com um forte acoplamento entre as componentes  $F_x / M_y$  e  $F_y / M_x$ . Esta relação deriva da própria construção do sensor e não poderá ser contornada. Terá que ser quantificada e tida em conta nos ensaios.

Notou-se igualmente a existência de interferências nas componentes  $M_x$ ,  $M_y$  e  $F_z$ , uma vez que todas elas são medidas por extensómetros colados no 3º andar.

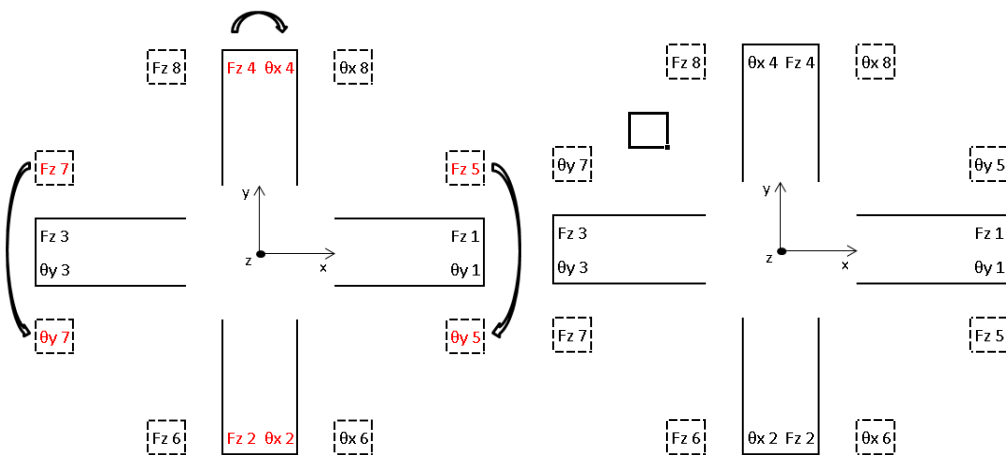
- **Alterações efectuadas**

Ao ligar o sensor ao sistema de aquisição de sinal para testar o seu funcionamento deparou-se com um sinal irregular na componente  $x$  da força. O sinal recebido denunciava a existência de um extensómetro possivelmente danificado ou descolado, assim sendo, optou-se por utilizar, para efectuar esta medição apenas quatro extensómetros, em vez dos iniciais oito que estavam programados, a nova disposição e ponte extensométrica estão representadas na Figura 3.20.

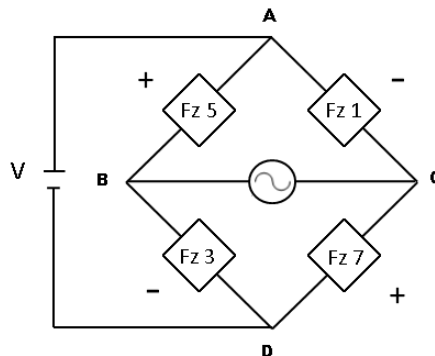


**Figura 3.20 – Novo esquema de disposição dos extensómetros (Esq.) nova Ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_x$  (Dir.)**

Outra alteração efectuada teve o objectivo de diminuir contribuições indesejadas na medição de  $M_x$  e  $M_y$ . Com a disposição anterior dos extensómetros, ao aplicar  $M_x$  as lâminas dispostas ao longo do eixo  $x$  sofrem torção, provocando uma contribuição indesejada no valor da extensão. O mesmo ocorre ao aplicar  $M_y$ , procedeu-se à alteração da disposição dos extensómetros (Figura 3.21) e da ponte extensométrica da componente  $F_z$  (Figura 3.22).



**Figura 3.21 – Alterações na disposição dos extensómetros (Esq.), novo esquema de disposição (Dir.)**



**Figura 3.22 – Nova ponte extensométrica da componente  $F_z$**

### 3.3. Métodos de Calibração Estática

Previamente a utilizar o sensor para medições de esforços estáticos é necessário proceder à sua calibração, uma vez que o objectivo é retirar nas medições efectuadas o efeito das interferências que sejam registadas.

Segundo o estudo bibliográfico, utilizaram-se dois métodos diferentes de calibração que seguidamente serão caracterizados. Cada um destes métodos tem como objectivo determinar a matriz de calibração que relaciona as extensões obtidas pelo sensor com os esforços que pretendemos medir.

Os esforços aplicados na calibração devem ser da mesma ordem de grandeza dos valores a que o sensor estará posteriormente sujeito.

De forma a poder avaliar a histerese do sensor as calibrações foram feitas para a situação de carga e descarga [10].

#### 3.3.1. Método dos declives

Este método consiste na aplicação de uma série de carregamentos, de diferentes valores, segundo as várias componentes da força e momentos, possibilitando assim a observação de erros de interferência.

Os valores são aplicados em incrementos sucessivos até um valor máximo definido.

Para cada carregamento é registado o valor das extensões provocadas na estrutura nas várias direcções de medição pretendidas. Seguidamente é feita uma regressão linear com os valores obtidos para os vários carregamentos impostos, o declive dessa regressão corresponde à constante de calibração numa determinada direcção devido ao carregamento imposto, este declive será um elemento da matriz de declives. A matriz de calibração é a matriz inversa da matriz de declives [4].

Caso não se verifiquem interferências do carregamento de uma determinada direcção nas restantes, a matriz de calibração seria uma matriz diagonal.

#### 3.3.2. Método dos mínimos quadrados

Para este método a medição das extensões para cada esforço faz-se da mesma forma. Varia apenas a forma de calcular a matriz de calibração. A matriz de calibração  $[K]$  ( $6 \times 6$ ) relaciona as extensões medidas com os esforços aplicados:

$$[F] = [K] \times [\epsilon] \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde,  $[F]$  é uma matriz coluna  $(6 \times 1)$  com as forças e momentos aplicados nas direcções ortogonais e  $[\epsilon]$  uma matriz coluna  $(6 \times 1)$  com as extensões registadas em cada componente da força e momento.

A matriz  $[K]$  é calculada pela seguinte equação:

$$[K] = [F]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T ([\epsilon]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T)^{-1} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde,  $[F]_{\text{calib}}$  é uma matriz que engloba todos os esforços aplicados nas medições feitas para a calibração, de dimensão  $(6 \times n)$ , sendo  $n$  o número de ensaios de calibração considerados. A matriz  $[\epsilon]_{\text{calib}}$  é a matriz das extensões medidas para cada um dos correspondentes ensaios de calibração realizados e tem dimensão  $(6 \times n)$  [10].

$[\epsilon]_{\text{calib}}^T$  é a matriz transposta de  $[\epsilon]_{\text{calib}}$ .

Na Bibliografia consultada [10] o autor afirma que calculando a matriz de calibração por este método, quanto mais informação utilizarmos, ou seja quantos mais ensaios de calibração forem feitos, mais sensibilidade terá a matriz de calibração e menores os erros.

Para que o sensor consiga detectar forças e momentos em todas as direcções pretendidas, a matriz de calibração terá que ter sido calculada com informação de testes que incluam esforços em todas estas direcções.





## 4. CALIBRAÇÃO UTILIZANDO MODELO NUMÉRICO

Ao longo deste capítulo serão demonstradas as simulações dos vários ensaios realizados através da modelação numérica do sensor, assim como a determinação do valor das extensões numéricas e o posterior cálculo e validação da matriz de calibração numérica pelos dois métodos de calibração já referidos.

### 4.1. Modelação Numérica

Para definirmos o modelo numérico do Projecto o sensor foi modelado tridimensionalmente (Figura 4.1) no *software Solidworks*.

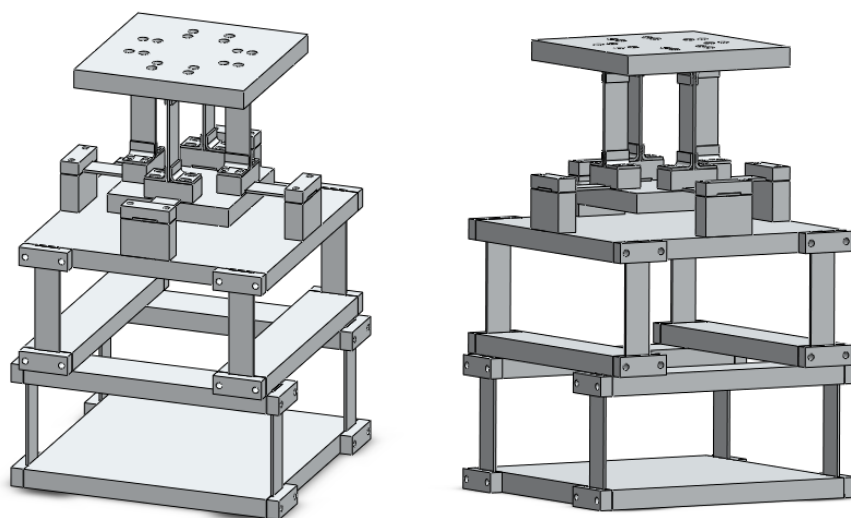


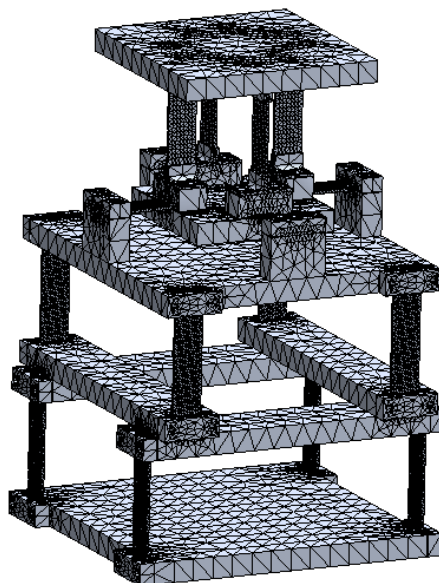
Figura 4.1 – Duas vistas do sensor modelado em *Solidworks*

### 4.2. Definição da malha

Na definição da malha de elementos finitos vários parâmetros foram definidos, os mais importantes são o tipo de elementos utilizados e o grau de refinamento da malha.

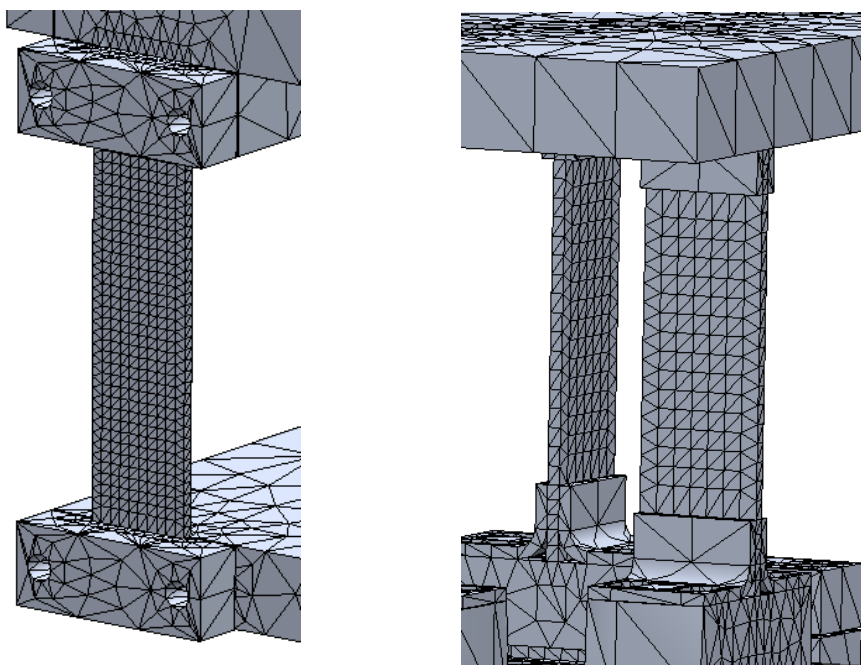
Tendo em conta que pretendemos medir a extensão nos pontos do sensor onde estão colados os extensómetros, era necessário que nessas zonas a malha fosse mais refinada do que noutras zonas que se comportam quase como corpos rígidos.

A malha criada (Figura 4.2) foi construída pelo processador do *Solidworks Simulation* com elementos sólidos de quatro pontos jacobianos.



**Figura 4.2 – Malha definida**

Foram feitos vários *Mesh Controls* (Figura 4.3) para a malha nas células onde se encontram os extensómetros como podemos observar nas figuras de detalhe.

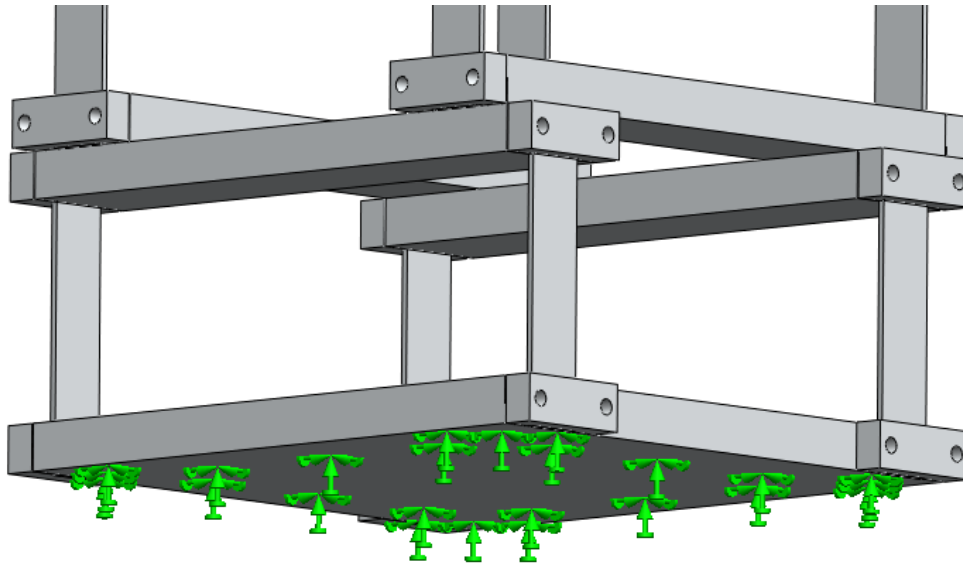


**Figura 4.3 – Detalhe da malha refinada nas células 1º andar (Esq.) Último andar (Dir.)**

### 4.3. Condições de Fronteira

Ao fazer a montagem dos vários constituintes do modelo no *Solidworks* todos as peças que estejam em contacto são consideradas como encastradas. Assim, de forma a simplificar a simulação, não foram incluídas no estudo as ligações aparafusadas. Considerou-se que a contribuição das mesmas no resultado final não traria valor acrescentado a este estudo.

Para fixar o modelo definiu-se que a base do sensor é uma geometria fixa. O que é equivalente a dizer que o sensor está encastrado pela base (Figura 4.4).



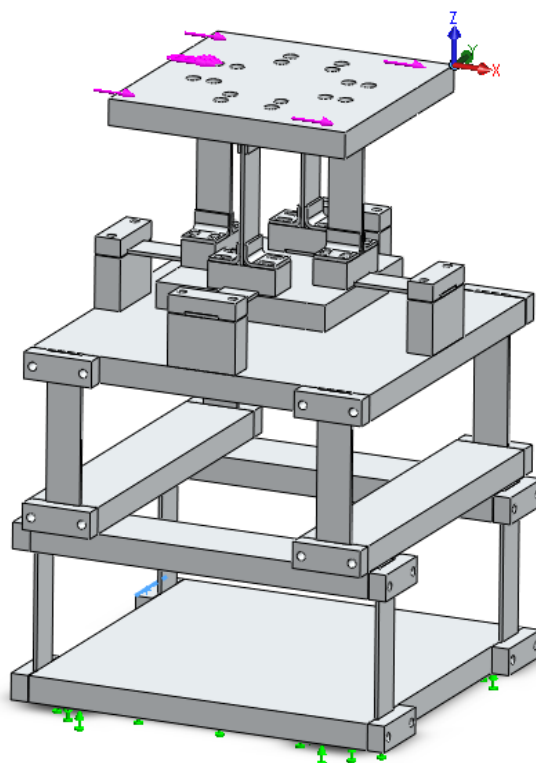
**Figura 4.4 – Encastramento da base do sensor**

### 4.4. Simulações

Seguidamente vão ser apresentadas as seis simulações feitas para cada uma das componentes do esforço.

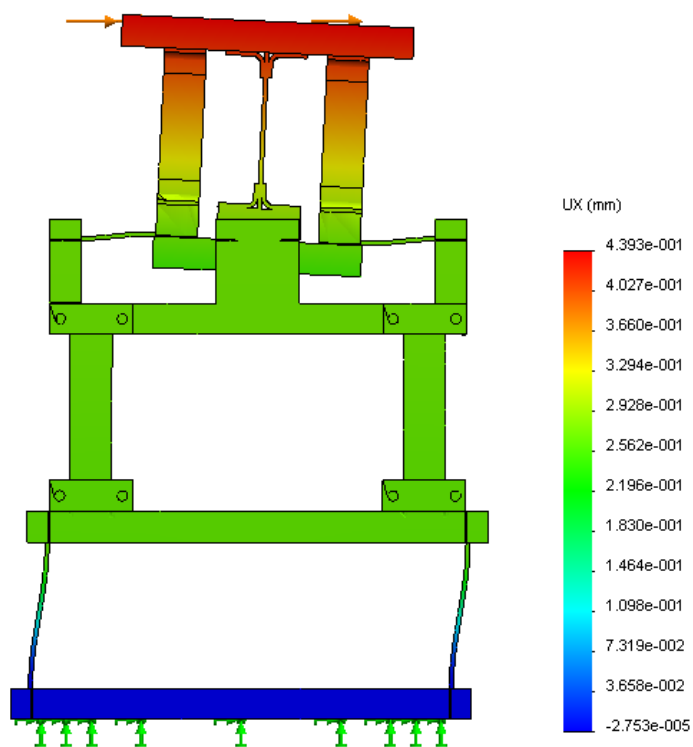
#### 4.4.1. Força x:

Foi aplicada uma força na direcção do eixo x (sentido positivo) ao topo do sensor, estando o mesmo encastrado pela base (Figura 4.5).

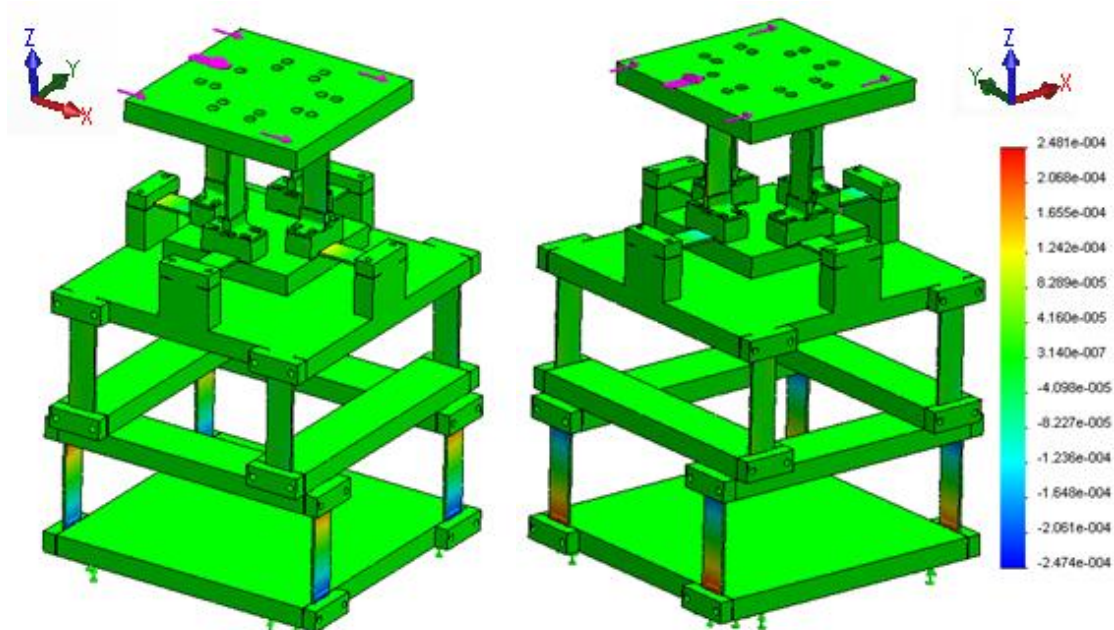


**Figura 4.5 – Aplicação da força  $F_x$**

Ao correr a simulação desta aplicação da força os resultados dos deslocamentos (Figura 4.6) e das extensões (Figura 4.7) foram:



**Figura 4.6 – Deslocamento eixo x do sensor ao aplicar  $F_x$  (deformação não à escala)**

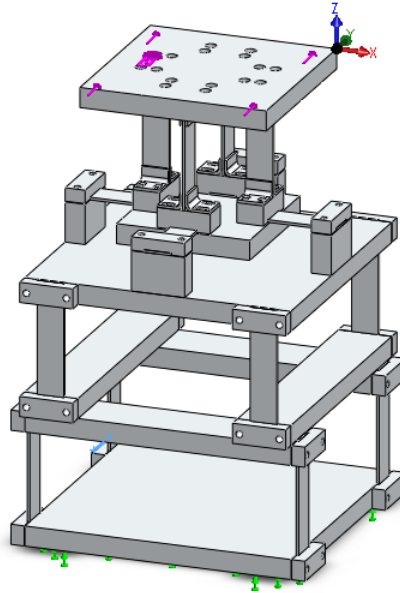


**Figura 4.7 – Extensões (eixo z) provocadas por  $F_x$  vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)**

Na Figura 4.7 é possível constatar que a maior extensão ocorre nas células do 1º andar que medem  $F_x$  e nas células do 3º andar que medem  $M_y$  embora as últimas em menor valor. Pode portanto concluir-se que sempre que seja aplicada uma força com componente na direcção x isso irá afectar a medição do momento segundo a direcção y, denotando pois que as duas medições não são desacopladas. Na construção da matriz de calibração este efeito “parasita” terá que ser contabilizado, por forma a conseguir retirá-lo nos valores obtidos para os esforços realmente aplicados.

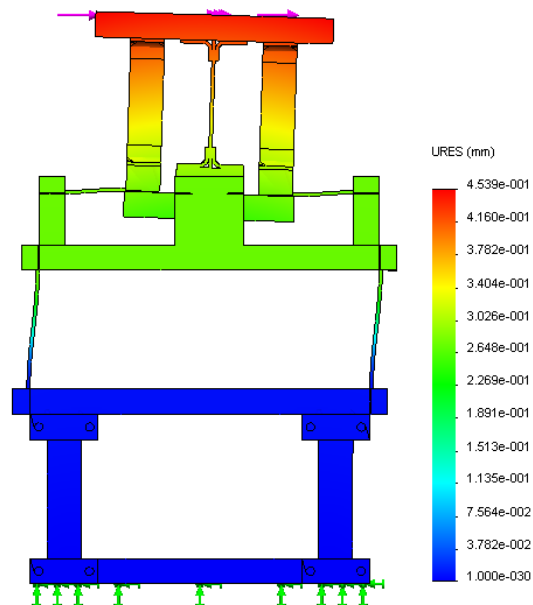
#### 4.4.2. Força y:

De igual forma foi aplicada uma força na direcção do eixo y (sentido positivo) ao topo do sensor, estando o mesmo encastrado pela base (Figura 4.8).

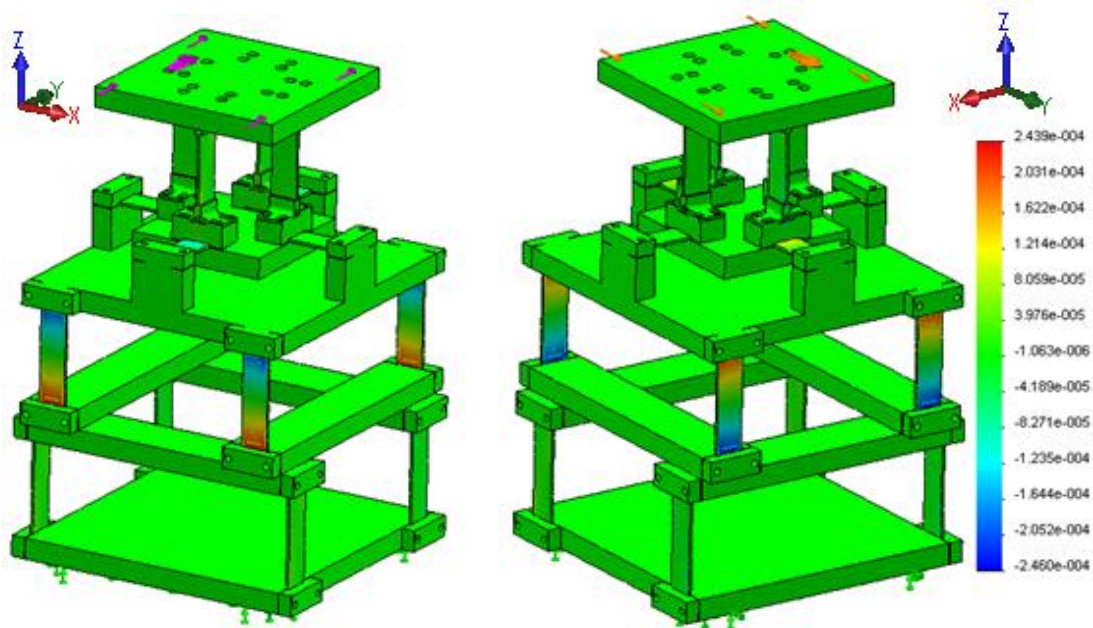


**Figura 4.8 – Aplicação da força  $F_y$**

Ao correr a simulação desta aplicação da força os resultados dos deslocamentos (Figura 4.9) e das extensões (Figura 4.10) foram:



**Figura 4.9 – Deslocamento eixo y do sensor ao aplicar  $F_y$  (deformação não à escala)**



**Figura 4.10 – Extensões (eixo z) provocadas por  $F_y$  vista simétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)**

Na Figura 4.10 é possível constatar que a maior extensão ocorre nas células do 2º andar que medem  $F_y$  e, com o valor inferior, nas células do 3º andar que medem  $M_x$ . Mais uma vez é visível o acoplamento destas duas componentes.

#### 4.4.3. Força z:

Foi aplicada uma força na direcção do eixo z (sentido positivo) ao topo do sensor, estando o mesmo encastrado pela base (Figura 4.11).

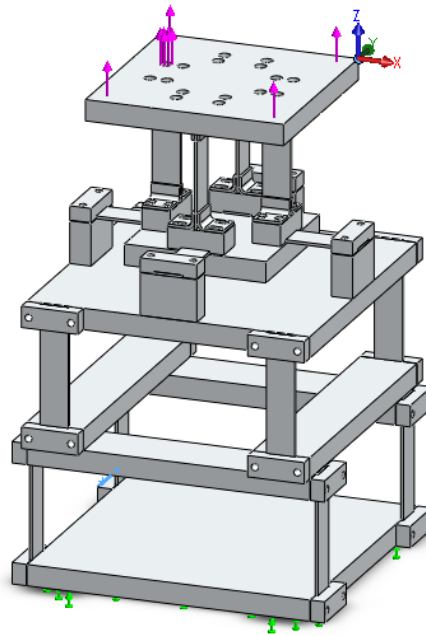


Figura 4.11 – Aplicação da força  $F_z$

Ao correr a simulação desta aplicação da força os resultados dos deslocamentos (Figura 4.12) e das extensões (Figura 4.13) foram:

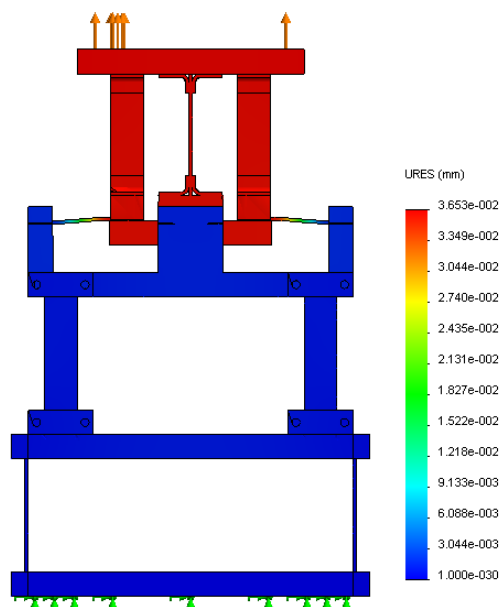
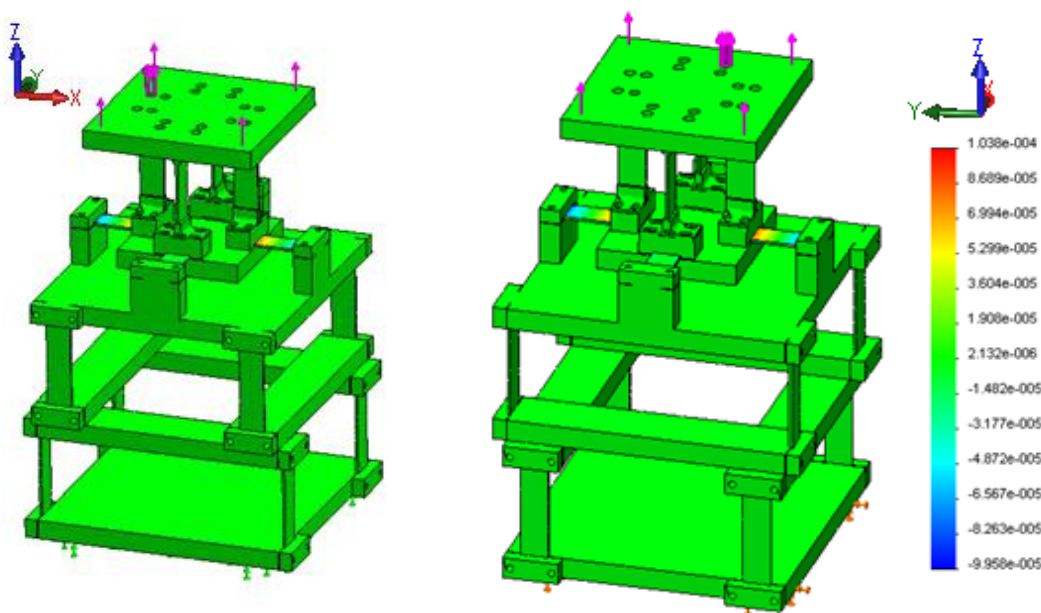


Figura 4.12 – Deslocamento eixo z do sensor ao aplicar  $F_z$  (deformação não à escala)



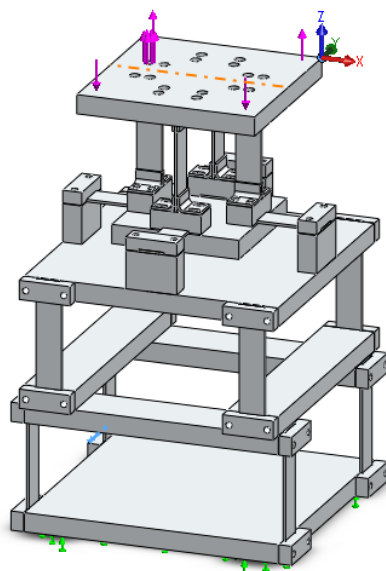


**Figura 4.13 – Extensões (eixo y) provocadas por  $F_z$  vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)**

Verifica-se na Figura 4.13 que o maior valor de extensão ocorre nas células do 3º andar, onde é medido  $F_z$ , os valores da extensão nas restantes células da peça podem ser desprezáveis.  $F_z$  é portanto uma componente desacoplada.

#### 4.4.4. Momento x:

O momento x foi simulado, aplicando uma rotação ao topo do sensor em torno do eixo x (sentido positivo), na Figura 4.14 o eixo de rotação está representado a tracejado laranja.



**Figura 4.14 – Aplicação do Momento x**

Ao correr a simulação desta aplicação do momento os resultados dos deslocamentos (Figura 4.15) e das extensões (Figura 4.16) foram:

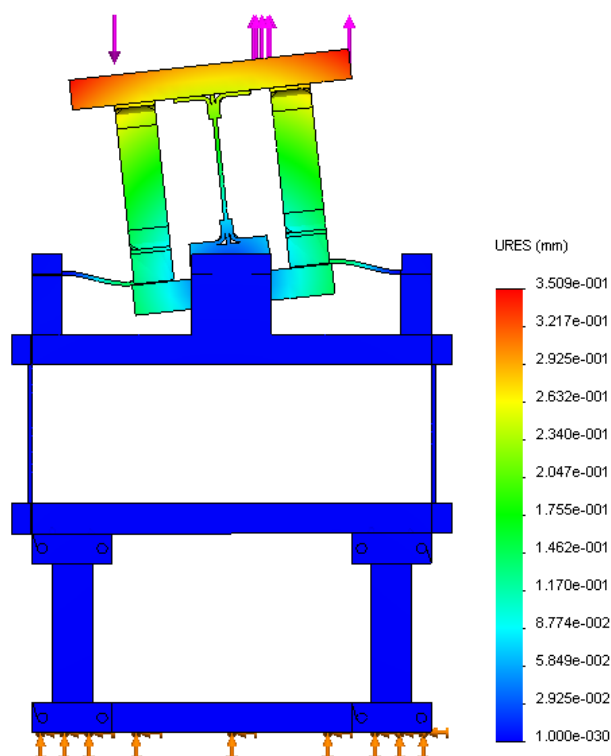


Figura 4.15 – Deslocamento do sensor ao aplicar  $M_x$  (deformação não à escala)

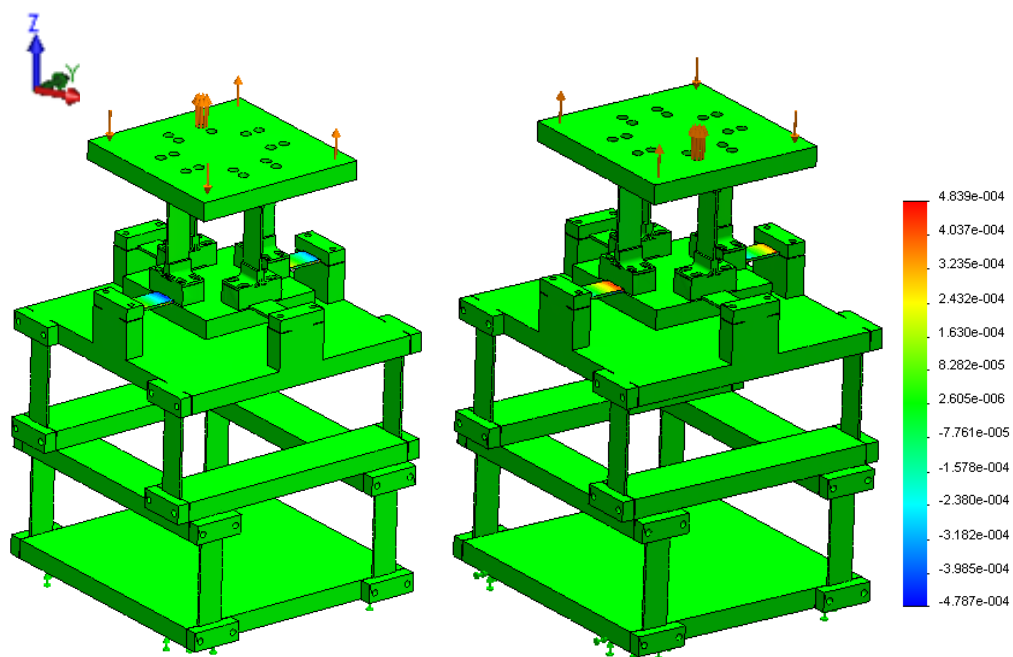


Figura 4.16 – Extensões (eixo y) provocadas por  $M_x$  vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)

Verifica-se na Figura 4.16 que o maior valor de extensão ocorre nas duas células do 3º andar que estão perpendiculares ao eixo de rotação. Os valores da extensão nas células do 1º e 2º andar da peça são considerados desprezáveis.

#### 4.4.5. Momento $y$ :

O momento  $y$  foi simulado, aplicando uma rotação ao topo do sensor em torno do eixo  $y$  (sentido positivo), na Figura 4.17 o eixo de rotação está representado a tracejado laranja.

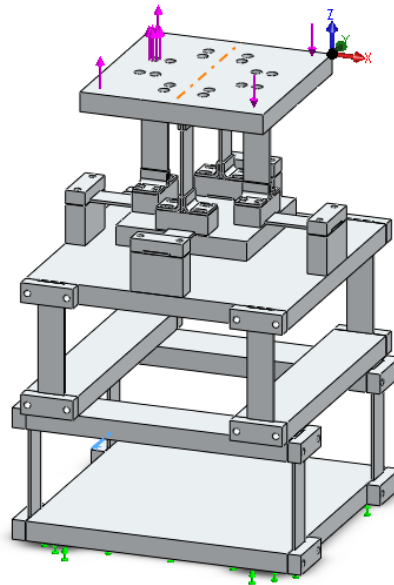


Figura 4.17 – Aplicação do Momento  $y$

Ao correr a simulação desta aplicação do momento os resultados dos deslocamentos (Figura 4.18) e das extensões (Figura 4.19) foram:

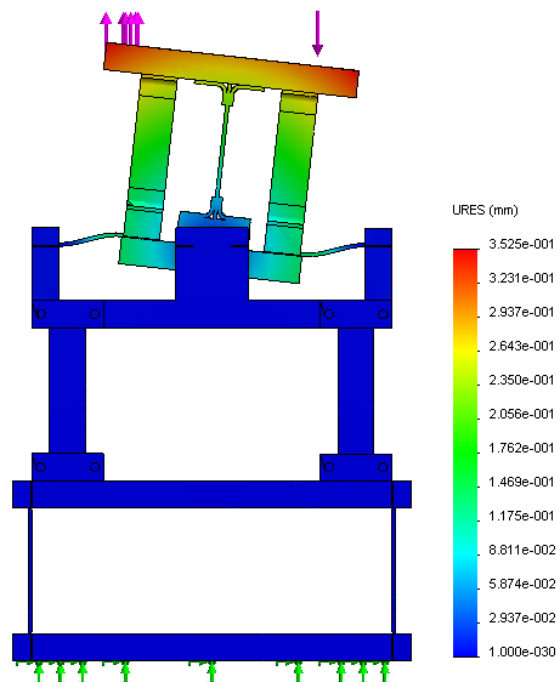
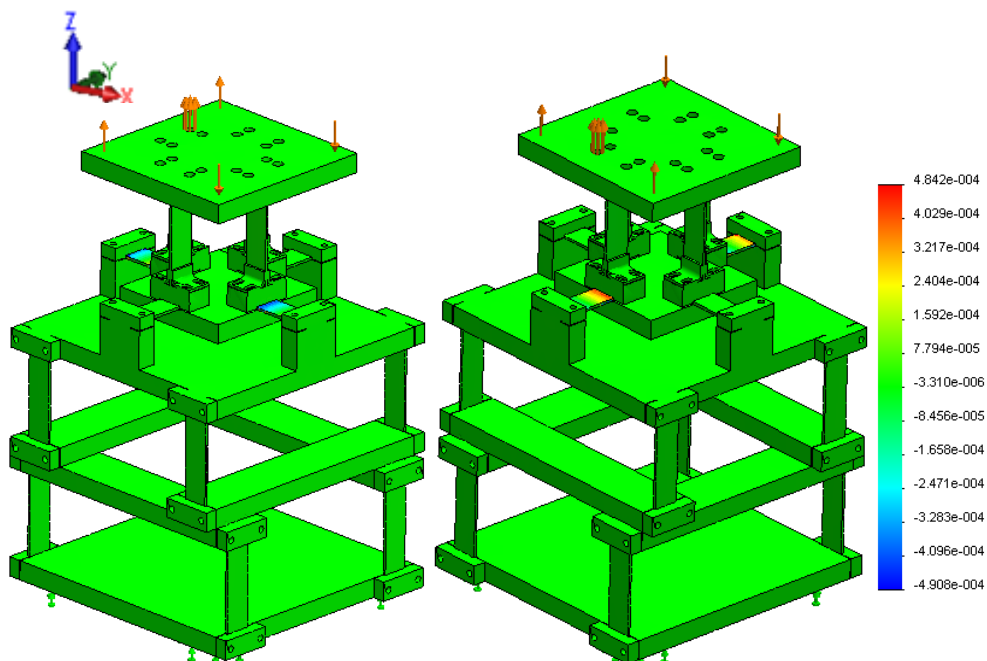


Figura 4.18 – Deslocamento do sensor ao aplicar  $M_y$  (deformação não à escala)

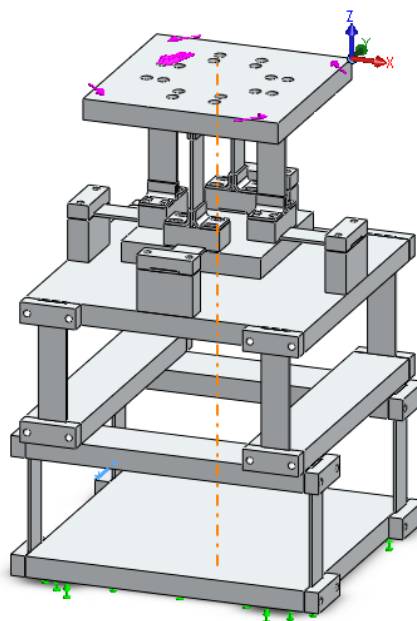


**Figura 4.19 – Extensões (eixo x) provocadas por  $M_y$  vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)**

Tal como acontece com  $M_x$ , verifica-se na Figura 4.19 que o maior valor de extensão ocorre nas duas células do 3º andar que estão perpendiculares ao eixo de rotação. Os valores da extensão nas células do 1º e 2º andar da peça são desprezáveis.

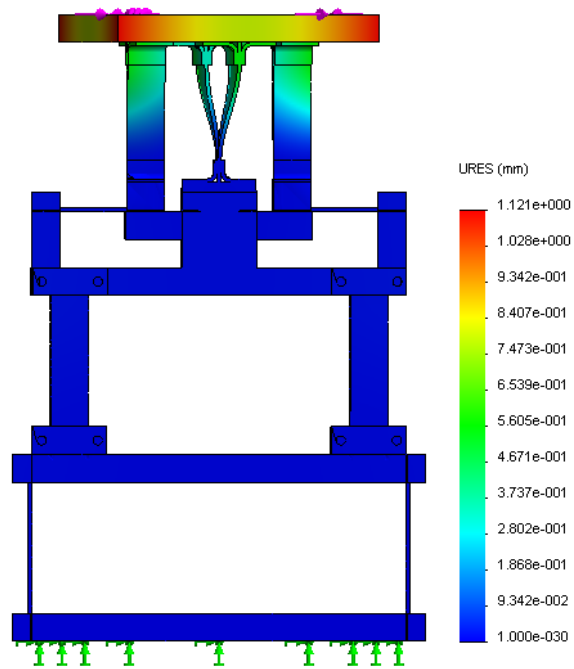
#### **4.4.6. Momento z:**

O momento z foi simulado aplicando uma rotação ao topo do sensor em torno do eixo z (sentido positivo), na Figura 4.20 o eixo de rotação está representado a tracejado laranja.

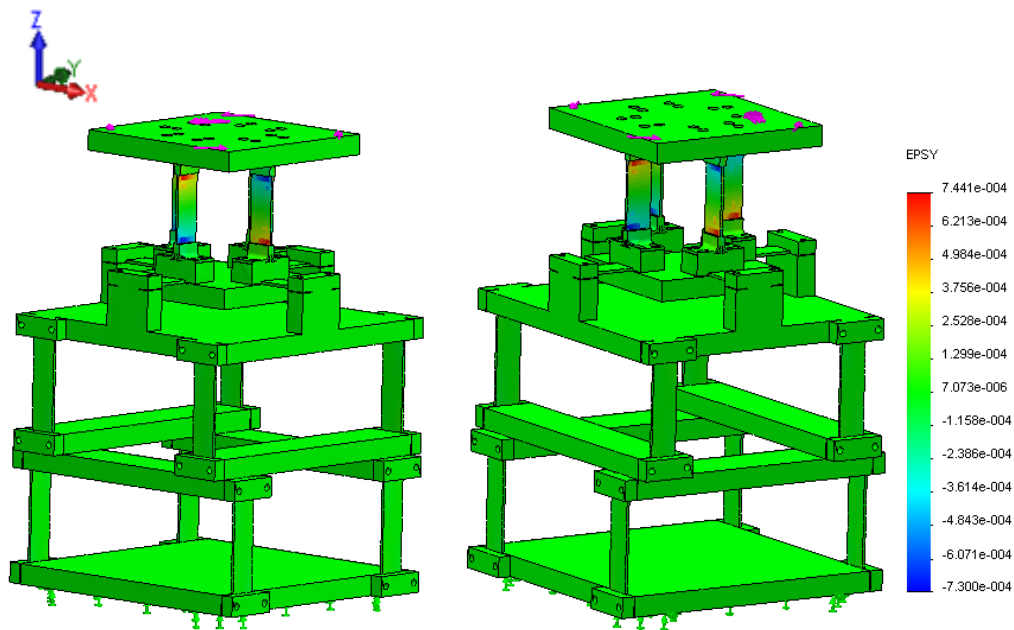


**Figura 4.20 – Aplicação do Momento z**

Ao correr a simulação desta aplicação do momento os resultados dos deslocamentos (Figura 4.21) e das extensões (Figura 4.22) foram:



**Figura 4.21 – Deslocamento do sensor ao aplicar  $M_z$  (deformação não à escala)**



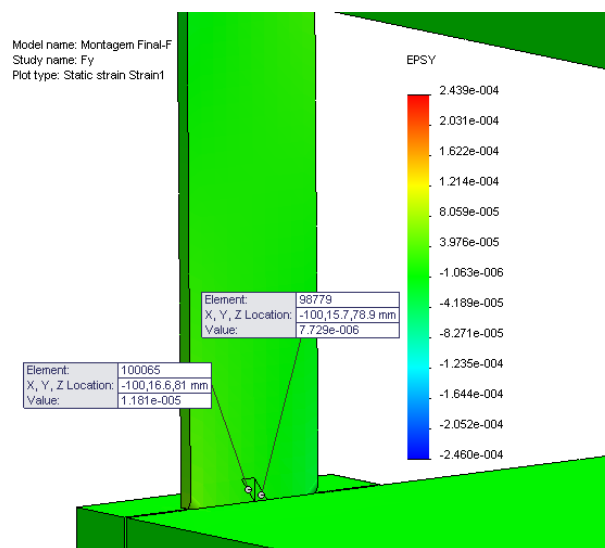
**Figura 4.22 – Extensões (eixo z) provocadas por  $M_z$  vista dimétrica (Esq.) vista com rotação (Dir.)**

Os únicos valores de extensão significativos ocorrem nas células do último andar como podemos observar na Figura 4.22.

## 4.5. Determinação do valor das extensões numéricas

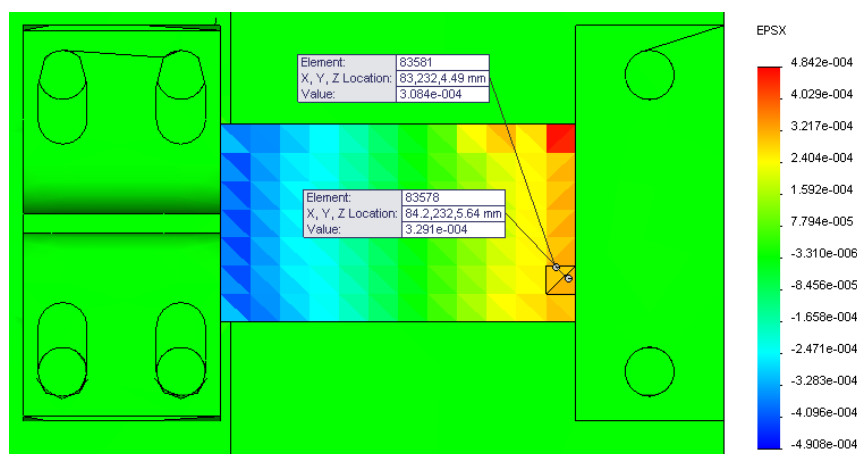
Utilizando as simulações feitas em *Solidworks*, foram determinadas as extensões numéricas dos locais das lâminas considerados de interesse., ou seja nos elementos finitos que se encontram nos locais aproximados onde os extensómetros estão colados.

Na Figura 4.23 é possível observar os valores de extensão para dois elementos de uma viga do 1º andar, que mede a componente x da força. Com a ferramenta “*probe*” seleccionaram-se os dois elementos centrais. O valor da extensão aplicada no extensómetro é uma média desses dois valores.



**Figura 4.23 – Determinação da extensão de uma das lâminas da componente  $F_x$  quando aplicado um esforço na componente  $F_y$**

Esta metodologia foi utilizada para as várias lâminas do sensor e aplicando esforços em cada uma das componentes. Na Figura 4.24 é possível observar outro exemplo desta técnica.



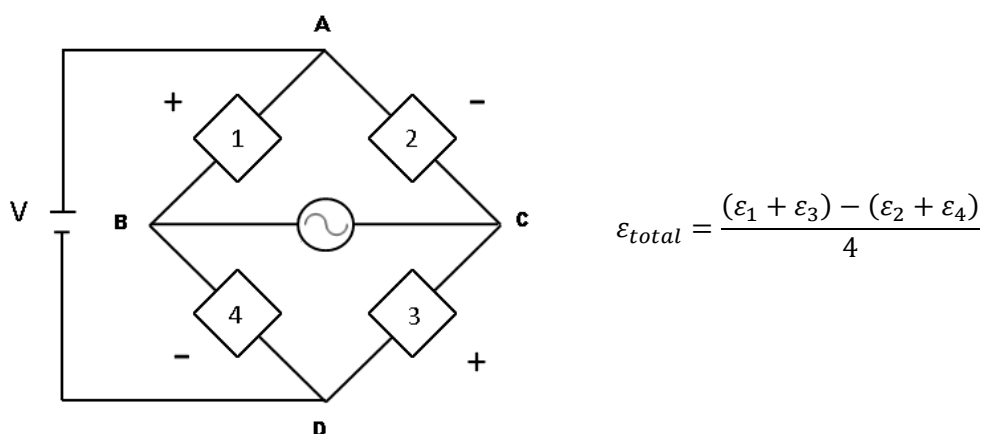
**Figura 4.24 – Determinação da extensão de uma das lâminas da componente  $M_y$  quando aplicado um esforço na mesma componente**

**Tabela 4.1 – Esforços aplicados na simulação em cada componente**

Esforços Aplicados	
<b>F<sub>x</sub></b>	34,4 (N)
<b>F<sub>y</sub></b>	34,4 (N)
<b>F<sub>z</sub></b>	34,4 (N)
<b>M<sub>x</sub></b>	6,5 (N.m)
<b>M<sub>y</sub></b>	6,5 (N.m)
<b>M<sub>z</sub></b>	6,5 (N.m)

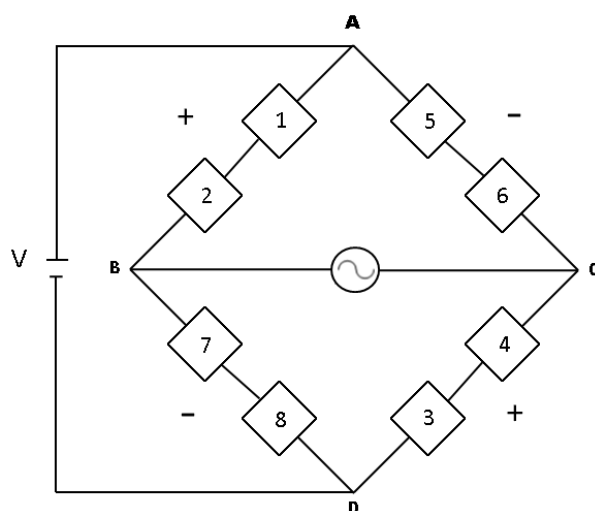
Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores máximos dos esforços que foram aplicados em cada simulação. Foi aplicado o mesmo valor do carregamento para cada uma das três componentes da força e dos momentos, assim é possível comparar os valores da extensão obtidos.

O cálculo das extensões em cada componente é feito através do cálculo da ponte extensométrica, como podemos observar na **Erro! Auto-referência de marcador inválida.** e Figura 4.26.



**Figura 4.25 – Cálculo da extensão total de uma componente recorrendo à ponte extensométrica**

$$\varepsilon_{total} = \frac{((\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)) - ((\varepsilon_5 + \varepsilon_6) + (\varepsilon_7 + \varepsilon_8))}{8}$$



**Figura 4.26 – Cálculo da extensão total de uma componente recorrendo à ponte extensométrica**

Na Tabela 4.2 podem ser observados os valores calculados das extensões teóricas para cada componente de medição, para cada um dos esforços aplicados. Cada coluna corresponde a um esforço aplicado, cada linha mostra o sinal de extensão das várias componentes.

**Tabela 4.2 – Extensões calculadas em cada componente, para cada esforço aplicado**

	<b>F<sub>x</sub></b>	<b>F<sub>y</sub></b>	<b>F<sub>z</sub></b>	<b>M<sub>x</sub></b>	<b>M<sub>y</sub></b>	<b>M<sub>z</sub></b>
<b>SF<sub>x</sub></b>	$2,2 \times 10^{-04}$	$-7,6 \times 10^{-09}$	$-4,0 \times 10^{-09}$	$1,8 \times 10^{-08}$	$-5,5 \times 10^{-06}$	$-1,6 \times 10^{-06}$
<b>SF<sub>y</sub></b>	$4,1 \times 10^{-08}$	$2,3 \times 10^{-04}$	$9,3 \times 10^{-09}$	$1,1 \times 10^{-07}$	$8,0 \times 10^{-09}$	$-1,8 \times 10^{-08}$
<b>SF<sub>z</sub></b>	$4,0 \times 10^{-07}$	$-2,5 \times 10^{-06}$	$-6,6 \times 10^{-05}$	$-5,5 \times 10^{-06}$	$-1,1 \times 10^{-06}$	$-3,2 \times 10^{-07}$
<b>SM<sub>x</sub></b>	$-8,4 \times 10^{-08}$	$-1,7 \times 10^{-04}$	$-4,5 \times 10^{-08}$	$3,2 \times 10^{-04}$	$2,1 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-05}$
<b>SM<sub>y</sub></b>	$1,7 \times 10^{-04}$	$-2,1 \times 10^{-07}$	$3,3 \times 10^{-07}$	$-3,0 \times 10^{-08}$	$3,2 \times 10^{-04}$	$8,4 \times 10^{-06}$
<b>SM<sub>z</sub></b>	$-4,6 \times 10^{-08}$	$1,2 \times 10^{-08}$	$-4,9 \times 10^{-09}$	$-4,2 \times 10^{-10}$	$-1,5 \times 10^{-08}$	$5,9 \times 10^{-04}$



## 4.6. Cálculo da Matriz de Calibração Numérica

Para calcular a matriz de calibração foram seguidos os dois métodos descritos na secção 2.3.

### 4.6.1. Método dos declives

Depois de determinadas as extensões, é possível calcular a matriz de calibração numérica do extensor, através da Eq.5:

$$[F] = [K] \times [\epsilon] \quad (\text{Eq. 5})$$

A matriz de calibração  $[K]$  pode ser calculada através da matriz inversa, denominada matriz de declives  $[K]^{-1}$ . Esta matriz de declives está representada na Tabela 4.3 e foi calculada dividindo cada elemento de uma dada coluna da matriz de extensões da Tabela 4.2 pelo valor máximo do esforço aplicado nessa direcção (Tabela 4.1)

**Tabela 4.3 – Declives calculados em cada componente para cada esforço aplicado**

	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
SF <sub>x</sub>	6,4 × 10 <sup>-06</sup>	-2,2 × 10 <sup>-10</sup>	-1,2 × 10 <sup>-10</sup>	2,8 × 10 <sup>-09</sup>	-8,4 × 10 <sup>-07</sup>	-2,5 × 10 <sup>-07</sup>
SF <sub>y</sub>	1,2 × 10 <sup>-09</sup>	6,6 × 10 <sup>-06</sup>	2,7 × 10 <sup>-10</sup>	1,7 × 10 <sup>-08</sup>	1,2 × 10 <sup>-09</sup>	-2,8 × 10 <sup>-09</sup>
SF <sub>z</sub>	1,2 × 10 <sup>-08</sup>	-7,2 × 10 <sup>-08</sup>	-1,9 × 10 <sup>-06</sup>	-8,4 × 10 <sup>-07</sup>	-1,7 × 10 <sup>-07</sup>	-4,9 × 10 <sup>-08</sup>
SM <sub>x</sub>	-2,4 × 10 <sup>-09</sup>	-5,1 × 10 <sup>-06</sup>	-1,3 × 10 <sup>-09</sup>	4,8 × 10 <sup>-05</sup>	3,2 × 10 <sup>-07</sup>	1,6 × 10 <sup>-06</sup>
SM <sub>y</sub>	5,1 × 10 <sup>-06</sup>	-6,1 × 10 <sup>-09</sup>	9,6 × 10 <sup>-09</sup>	-4,6 × 10 <sup>-09</sup>	4,8 × 10 <sup>-05</sup>	1,3 × 10 <sup>-06</sup>
SM <sub>z</sub>	-1,3 × 10 <sup>-09</sup>	3,5 × 10 <sup>-10</sup>	-1,4 × 10 <sup>-10</sup>	-6,4 × 10 <sup>-11</sup>	-2,4 × 10 <sup>-09</sup>	9,0 × 10 <sup>-05</sup>

Na tabela estão representados a azul os elementos da diagonal, e a vermelho as principais interferências. Num sensor totalmente desacoplado (ideal) a matriz da tabela seria uma matriz diagonal, o que indicaria que apenas se verificavam valores de extensão nas componentes em que se aplicava o esforço.

Como era esperado desde a avaliação prévia do sensor, confirmou-se que a aplicação de um esforço na componente x da força, provoca uma forte interferência na componente y e do momento. Analogamente um esforço aplicado na componente y da força provoca interferência na componente x do momento. Estas componentes estão portanto acopladas. De forma a realçar este efeito de acoplamento entre essas componentes podemos observar a Tabela 4.4 que mostra, em percentagem, o valor da interferência verificado de cada componente em relação à componente em que foi aplicado o esforço.

**Tabela 4.4 – Interferências observadas entre as várias componentes do sensor (%)**

	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
SF <sub>x</sub>	-	0,0	0,0	0,0	1,7	0,3
SF <sub>y</sub>	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0
SF <sub>z</sub>	0,2	1,1	-	1,7	0,4	0,1
SM <sub>x</sub>	0,0	77,0	0,1	-	0,7	1,7
SM <sub>y</sub>	78,8	0,1	0,5	0,0	-	1,4
SM <sub>z</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Os valores a vermelho mais uma vez realçam o acoplamento entre as componentes F<sub>x</sub>/M<sub>y</sub> e F<sub>y</sub>/M<sub>x</sub>. Este efeito “parasita” terá que ser tomado em consideração na matriz de calibração por forma a conseguir retirá-lo dos valores obtidos para os esforços realmente aplicados.

A matriz de calibração pode ser calculada invertendo a matriz de declives e está representada seguidamente:

$$[K] = \begin{bmatrix} 1,5E+05 & 1,1E+00 & 4,0E+00 & -8,6E+00 & 2,7E+03 & 3,9E+02 \\ -2,5E+01 & 1,5E+05 & 2,1E+01 & -5,2E+01 & -3,9E+00 & 5,7E+00 \\ 2,3E+03 & -1,3E+04 & -5,2E+05 & -9,0E+03 & -1,7E+03 & -9,5E+01 \\ 1,1E+02 & 1,6E+04 & -1,2E+01 & 2,1E+04 & -1,4E+02 & -3,6E+02 \\ -1,6E+04 & 2,3E+01 & 1,0E+02 & 4,7E+00 & 2,0E+04 & -3,4E+02 \\ 1,9E+00 & -6,1E-01 & -8,3E-01 & 4,9E-04 & 5,8E-01 & 1,1E+04 \end{bmatrix}$$

Esta matriz relaciona as extensões registadas com o esforço aplicado pela Eq.5.

#### 4.6.2. Método dos Mínimos Quadrados

À semelhança do método dos declives, a determinação das extensões é feita através do cálculo das pontes extensométricas, na matriz da Tabela 4.5 encontram-se os valores das extensões medidas em cada ensaio de calibração, nos vários componentes da força e momentos.

**Tabela 4.5 – Matriz  $[\epsilon]_{\text{calib}}$  das extensões medidas em cada ensaio de calibração realizado**

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	$2,2 \times 10^{-04}$	$-7,6 \times 10^{-09}$	$-4,0 \times 10^{-09}$	$1,8 \times 10^{-08}$	$-5,5 \times 10^{-06}$	$-1,6 \times 10^{-06}$
SFy	$4,1 \times 10^{-08}$	$2,3 \times 10^{-04}$	$9,3 \times 10^{-09}$	$1,1 \times 10^{-07}$	$8,0 \times 10^{-09}$	$-1,8 \times 10^{-08}$
SFz	$4,0 \times 10^{-07}$	$-2,5 \times 10^{-06}$	$-6,6 \times 10^{-05}$	$-5,5 \times 10^{-06}$	$-1,1 \times 10^{-06}$	$-3,2 \times 10^{-07}$
SMx	$-8,4 \times 10^{-08}$	$-1,7 \times 10^{-04}$	$-4,5 \times 10^{-08}$	$3,2 \times 10^{-04}$	$2,1 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-05}$
SMy	$1,7 \times 10^{-04}$	$-2,1 \times 10^{-07}$	$3,3 \times 10^{-07}$	$-3,0 \times 10^{-08}$	$3,2 \times 10^{-04}$	$8,4 \times 10^{-06}$
SMz	$-4,6 \times 10^{-08}$	$1,2 \times 10^{-08}$	$-4,9 \times 10^{-09}$	$-4,2 \times 10^{-10}$	$-1,5 \times 10^{-08}$	$5,9 \times 10^{-04}$

Na Tabela 4.6 estão representados os valores dos esforços aplicados nos ensaios de calibração.

**Tabela 4.6 – Matriz  $[F]_{\text{calib}}$  com os valores de forças e momentos aplicados nas direcções ortogonais**

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
SFx	<b>34,4</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SFy	0,0	<b>34,4</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
SFz	0,0	0,0	<b>34,4</b>	0,0	0,0	0,0
SMx	0,0	0,0	0,0	<b>6,5</b>	0,0	0,0
SMy	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>6,5</b>	0,0
SMz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>6,5</b>

Utilizando estas duas matrizes é possível, através da Eq.6, calcular a nova matriz de calibração  $[K]$ .

$$[K] = [F]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T ([\epsilon]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T)^{-1} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 1,5E+05 & 1,1E+00 & 4,0E+00 & -8,6E+00 & 2,7E+03 & 3,9E+02 \\ -2,5E+01 & 1,5E+05 & 2,1E+01 & -5,2E+01 & -3,9E+00 & 5,7E+00 \\ 2,3E+03 & -1,3E+04 & -5,2E+05 & -9,1E+03 & -1,7E+03 & -9,5E+01 \\ 1,1E+02 & 1,6E+04 & -1,2E+01 & 2,1E+04 & -1,4E+02 & -3,6E+02 \\ -1,6E+04 & 2,3E+01 & 1,0E+02 & 4,7E+00 & 2,0E+04 & -3,4E+02 \\ 1,9E+00 & -6,1E-01 & -8,3E-01 & 4,9E-04 & 5,8E-01 & 1,1E+04 \end{bmatrix}$$

## 4.7. Validação da matriz de calibração

Após o cálculo das matrizes de calibração numéricas, surge a necessidade de comprovar a sua eficácia através de ensaios de aplicação de esforços. Recorrendo uma vez mais ao *software* de simulação do *SolidWorks*, efectuaram-se ensaios de teste de aplicação de forças, momentos e esforços combinados. Registaram-se as extensões medidas.

### 4.7.1. Esforços Aplicados

Os valores de forças e momentos aplicados nos ensaios de teste numéricos estão representados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Esforços aplicados nos ensaios de teste

Esforços Aplicados	
Força	24,6457 (N)
Momento	0,76 (N.m)

### 4.7.2. Ensaio de aplicação de força

- Medição  $F_y$

Simulou-se a aplicação de uma força de componente y, representada na Figura 4.27

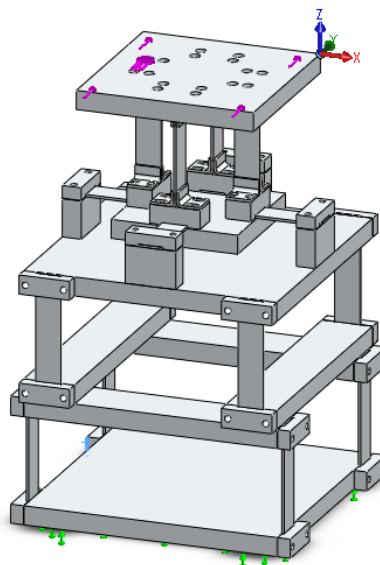


Figura 4.27 – Ensaio  $F_y$

Na 2ª coluna da Tabela 4.8 estão descritos os valores das extensões medidas em cada componente da força e momento no ensaio  $F_y$ , ou seja, a matriz  $[\epsilon]$ . Seguindo o cálculo matricial da Eq. 5 é possível determinar o valor prático do esforço aplicado em cada componente. Onde  $[K]$  é a matriz de calibração calculada anteriormente.

$$[F] = [K] \times [\epsilon] \quad (\text{Eq. 5})$$

Na Tabela 4.8 este cálculo foi realizado utilizando a matriz de calibração numérica calculada por cada um dos métodos de calibração.

**Tabela 4.8 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_y$**

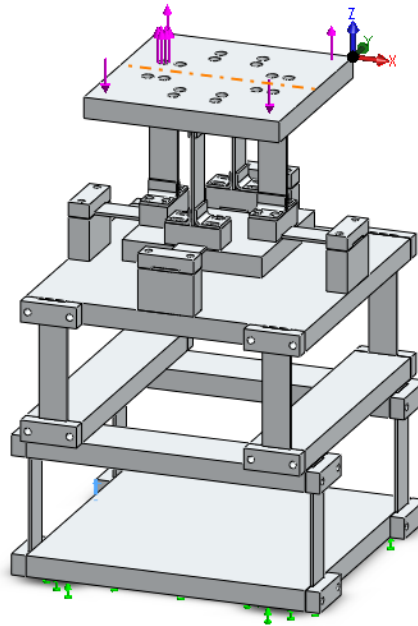
	Medições F <sub>y</sub>							
	Extensão	Declives			Mínimos Quadrados			
		Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio	
SFx	-4,62 X 10 <sup>-09</sup>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001	
SFy	1,62 X 10 <sup>-04</sup>	24,6467	24,6457	0,0010	24,6467	24,6457	0,0010	
SFz	-1,79 X 10 <sup>-06</sup>	0,0002	0	0,0002	0,0002	0	0,0002	
SMx	-1,25 X 10 <sup>-04</sup>	-0,0002	0	0,0002	-0,0002	0	0,0002	
SMy	-1,51 X 10 <sup>-07</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000	
SMz	8,62 X 10 <sup>-09</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000	
Erro Fy (%):				0,0040	Erro Fy (%): 0,0040			

O valor real na tabela corresponde aos esforços aplicados na realização do ensaio. Foi determinado o desvio entre o valor real esperado e o valor calculado pela matriz de calibração, através dos desvios determinou-se o valor do erro relativo da componente  $F_y$ . Comparando o valor dos erros do método dos declives e dos mínimos quadrados verifica-se que os valores são muito aproximados, diferindo apenas a partir da 6ª casa decimal.

### 4.7.3. Ensaio de aplicação de momento

- **Medição  $M_x$**

Neste ensaio (Figura 4.28) à semelhança do ensaio de calibração de  $M_x$ , simulou-se a aplicação de um momento em torno do eixo x



**Figura 4.28 – Ensaio  $M_x$**

Os esforços foram calculados seguindo o método anteriormente descrito e os valores estão representados na Tabela 4.9. Observa-se que os dois métodos retornam valores muito semelhantes.

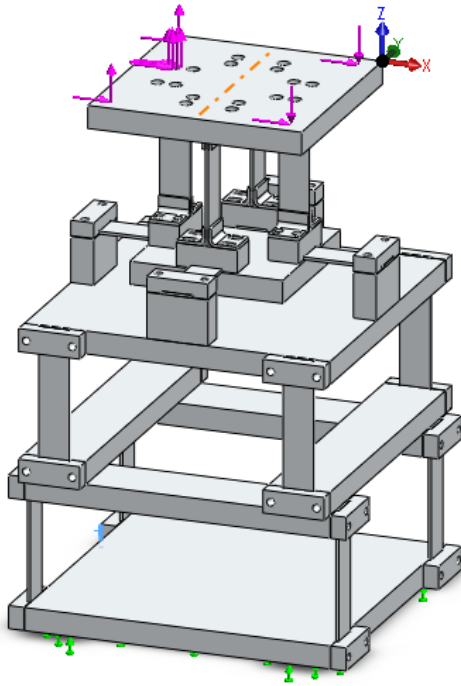
**Tabela 4.9 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $M_x$**

	Medições M <sub>x</sub>						
	Extensão	Declives			Mínimos Quadrados		
		Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	2,14 X 10 <sup>-09</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>y</sub>	1,26 X 10 <sup>-08</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>z</sub>	-6,46 X 10 <sup>-07</sup>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
SM <sub>x</sub>	3,70 X 10 <sup>-05</sup>	0,7640	0,7640	0,0000	0,7640	0,7640	0,0000
SM <sub>y</sub>	-3,75 X 10 <sup>-09</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SM <sub>z</sub>	9,44 X 10 <sup>-11</sup>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
Erro M <sub>x</sub> (%):				0,0006	Erro M <sub>x</sub> (%):		0,0006

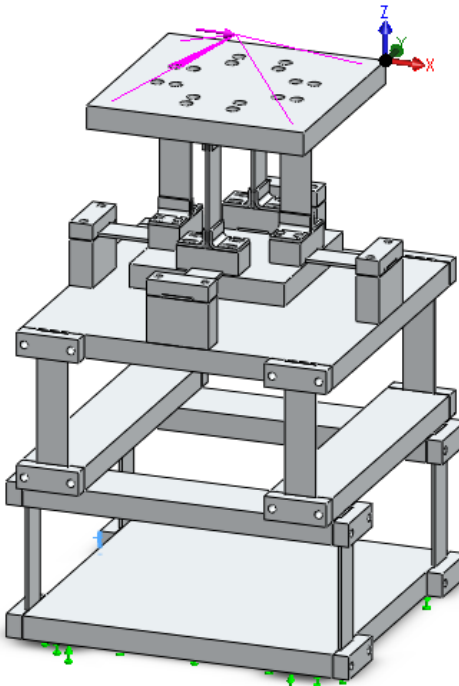
#### 4.7.4. Ensaios de forças e momentos combinados

Foram realizados ensaios de momentos e forças combinados com o intuito de verificar a eficácia das matrizes de calibração determinadas pelos dois métodos descritos.

- Medição  $F_x + M_y$



- Medição  $F_x, M_y$



**Figura 4.29 – Ensaios  $F_x + M_y$  (Esquerda) e  $F_x, M_y$  (Direita)**

Os dois ensaios da Figura 4.29 são semelhantes, os dois apresentam um esforço aplicado na componente x da força e na componente y do momento.

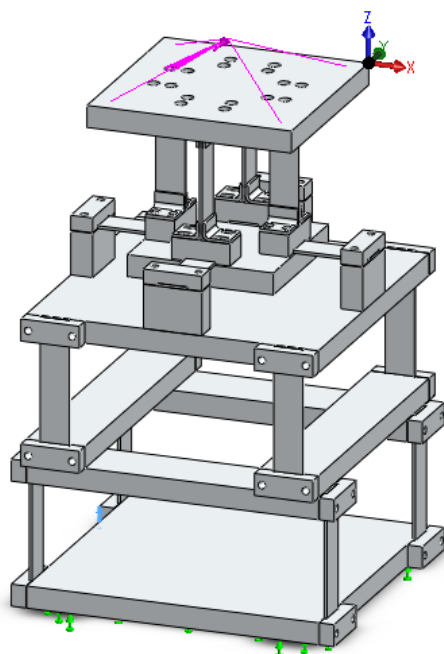
Na Tabela 4.10 verifica-se que os valores dos erros são muito reduzidos e os dois métodos apresentam valores que só diferem na 6ª casa decimal.

**Tabela 4.10 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_x, M_y$**

		Medições $F_x, M_y$					
	Extensão	Declives			Mínimos Quadrados		
		Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	$1,58 \times 10^{-04}$	24,6446	24,6457	0,0011	24,6446	24,6457	0,0011
SF <sub>y</sub>	$2,98 \times 10^{-08}$	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>z</sub>	$3,62 \times 10^{-07}$	-0,1049	0	0,1049	-0,1049	0	0,1049
SM <sub>x</sub>	$-2,25 \times 10^{-08}$	-0,0043	0	0,0043	-0,0043	0	0,0043
SM <sub>y</sub>	$1,62 \times 10^{-04}$	0,7650	0,7640	0,0010	0,7650	0,7640	0,0010
SM <sub>z</sub>	$-3,48 \times 10^{-08}$	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
		Erro F <sub>x</sub> (%): 0,0045			Erro F <sub>x</sub> (%): 0,0045		
		Erro M <sub>y</sub> (%): 0,1328			Erro M <sub>y</sub> (%): 0,1328		

Nas figuras seguintes estão representados os restantes ensaios realizados, para cada ensaio foram calculados os esforços e determinados os valores dos erros, as tabelas encontram-se apresentadas no Anexo B.

- Medição  $F_y$ ,  $M_x$



- Medição  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$

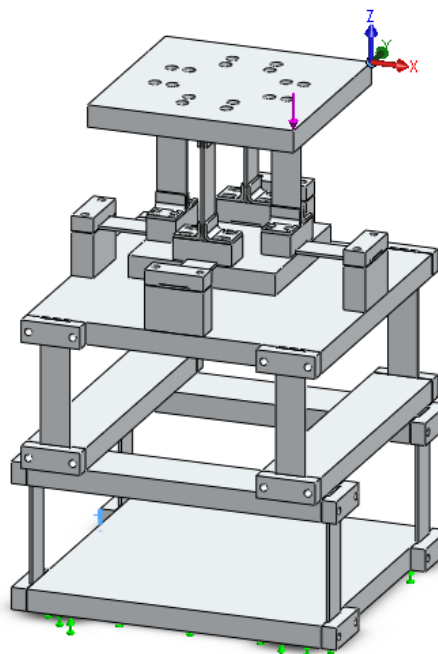
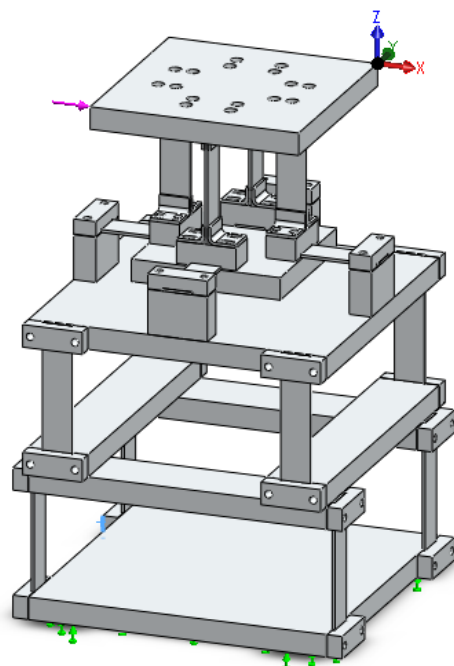


Figura 4.30 – Ensaio  $F_y$ ,  $M_x$  (Esquerda) e  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  (Direita)

- Medição  $F_x$ ,  $M_z$



- Medição  $F_y$ ,  $M_z$

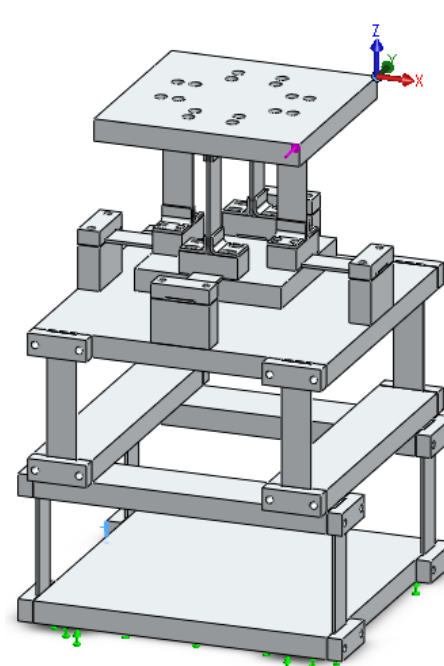


Figura 4.31 – Ensaio  $F_x$ ,  $M_z$  (Esquerda) e  $F_y$ ,  $M_z$  (Direita)



#### 4.7.5. Análise de Erros

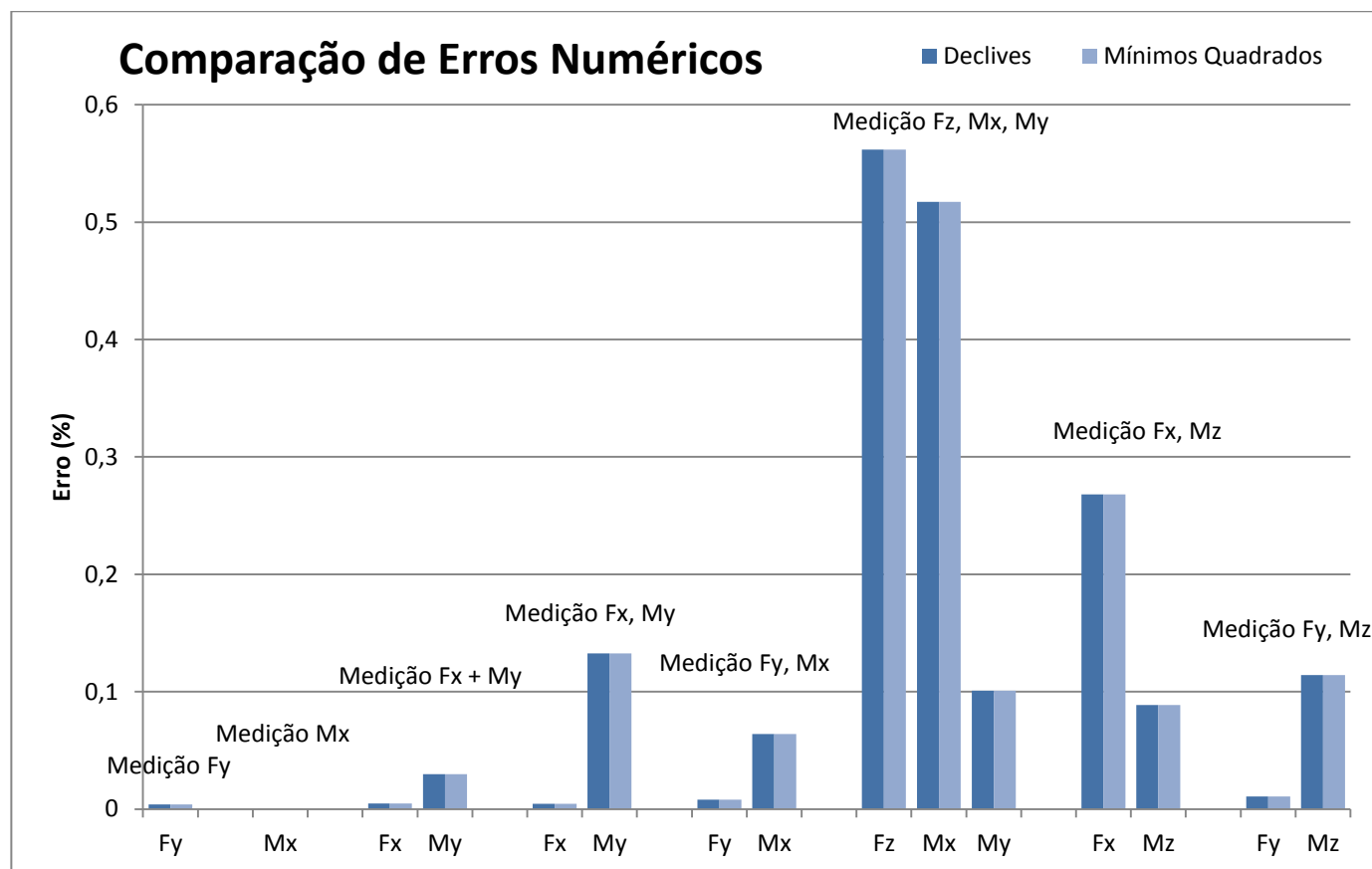
Na Tabela 4.11 estão representados os erros verificados em cada um dos ensaios atrás descritos, a análise da tabela permite concluir que não existem diferenças significativas entre os valores obtidos com os dois métodos de calibração. Os valores dos erros apenas mostram diferenças a partir da 6ª casa decimal, no entanto o valor menor do erro está representado a verde.

**Tabela 4.11 – Comparação de erros de medição entre os dois métodos utilizados**

		Forças	
		Declives	Mínimos Quadrados
Ensaio Fy	Erro Fy (%):	0,004	0,004
		Momentos	
		Declives	Mínimos Quadrados
Ensaio Mx	Erro Mx (%):	0,001	0,001
		Combinados	
		Declives	Mínimos Quadrados
Ensaio Fx+My	Erro Fx (%):	0,005	0,005
	Erro My (%):	0,030	0,030
Ensaio Fx, My	Erro Fx (%):	0,005	0,005
	Erro My (%):	0,133	0,133
Ensaio Fy, Mx	Erro Fy (%):	0,008	0,008
	Erro Mx (%):	0,064	0,064
Ensaio Fz, Mx, My	Erro Fz (%):	0,562	0,561
	Erro Mx (%):	0,517	0,517
	Erro My (%):	0,101	0,101
Ensaio Fx, Mz	Erro Fx (%):	0,268	0,268
	Erro Mz (%):	0,089	0,089
Ensaio Fy, Mz	Erro Fy (%):	0,011	0,011
	Erro Mz (%):	0,114	0,114

Conclui-se que na realização de ensaios numéricos ambas as abordagens estudadas para a determinação da matriz de calibração permitiram obter bons resultados, no entanto o método dos mínimos quadrados é significativamente menos complexo do que o método dos declives.

O gráfico da Figura 4.32 permite comparar uma vez mais os dois métodos de calibração e a diferença do valor dos erros em cada ensaio realizado.



**Figura 4.32 – Gráfico comparativo dos valores dos erros para os métodos de calibração utilizados**

Através da análise dos erros obtidos em todos os ensaios, comprova-se a eficácia das duas matrizes de calibração calculadas. Este facto permite concluir que estes dois métodos podem ser utilizados para a correcta calibração do sensor.

## 5. CALIBRAÇÃO UTILIZANDO MODELO EXPERIMENTAL

Neste capítulo descreve-se não só a forma como foram realizadas as montagens experimentais necessárias à determinação da matriz de calibração mas também o sistema de aquisição de dados e as pontes extensométricas utilizadas.

### 5.1. Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados em tempo real é feita através de sensores, neste caso extensómetros, ligados a um sistema de aquisição de sinais, este sistema comunica com um computador, onde através de uma interfase gráfica é possível visualizar, interpretar e armazenar os sinais recolhidos

O sistema físico de aquisição consiste num computador e numa placa SCXI (*Signal conditioning extensions for instrumentation*), onde são ligados os extensómetros. Neste trabalho foi utilizado o chassis NI SCXI 1000 e a placa NI SCXI-1314 da *National Instruments* representados na Figura 5.1.



**Figura 5.1 - Chassis NI SCXI 1000 e placa NI SCXI-1314**

## 5.2. Programação em *Labview*

Todo o processo de aquisição de dados é feito recorrendo ao *software LabView*. As principais funções deste programa são a realização de medições e também a automação.

Uma rotina realizada em *LabView* é chamada instrumento virtual (VI – *Virtual Instrument*). Um VI é composto por um conjunto de instruções que fazem o controlo e fluxo de dados. Um VI está dividido em duas partes:

- Painel Frontal – é a interface com o utilizador, onde estão apresentados de forma visual todos os controlos e botões de acção, assim como o registo de valores e gráficos. Permite uma interacção fácil com o utilizador.
- Diagrama de blocos – Contém o código do programa, construído de forma gráfica o que substitui as habituais linhas de código, tornando assim a programação mais intuitiva.

## 5.3. Programa utilizado

### 5.3.1. Painel Frontal

É nesta janela do *software* (Figura 5.2) que ocorre a interface com o utilizador. Este painel pretende ser o mais interactivo possível. Na parte A, destacada a vermelho na imagem, fornecem-se os *inputs* necessários ao início do programa, define-se o período de aquisição de dados, os factores de calibração, são dadas ordens para que seja ou não executado o processo de calibração, indicam-se quais os canais utilizados pelo sistema de aquisição e define-se a pasta onde guardar os dados em ficheiro.

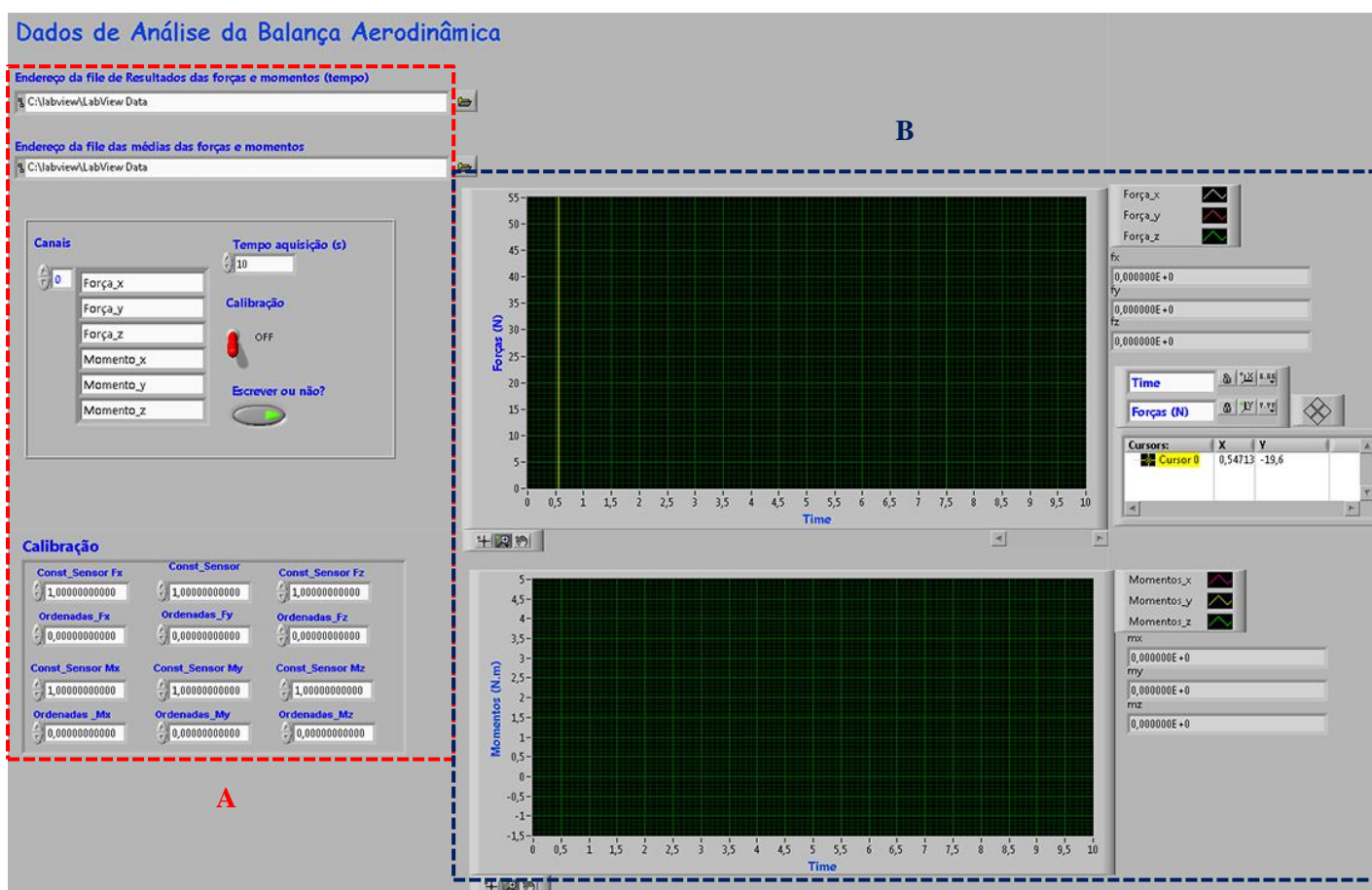


Figura 5.2 – Painel frontal do programa utilizado

Na parte B da imagem são fornecidos os *outputs* do programa, no gráfico superior são fornecidos os valores das 3 componentes da força a variar com o tempo e à direita do gráfico a média desses valores para cada componente. Do gráfico abaixo retiram-se os valores das 3 componentes do momento em função do tempo e à direita os correspondentes valores médios.

### 5.3.2. Diagrama de Blocos

A programação da recolha e análise de dados é feita no diagrama de blocos, a sua arquitectura permite, através da ligação de vários blocos de funções, denominados VI's definir toda a programação necessária. Estes blocos substituem as comuns linhas de código e assim toda a programação é desenvolvida graficamente e de uma forma intuitiva.

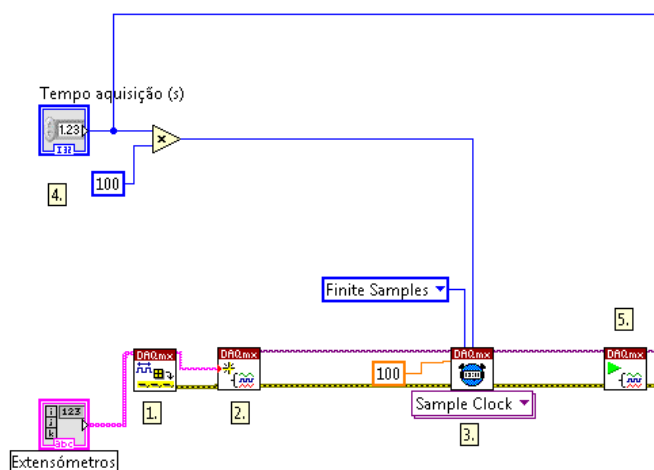
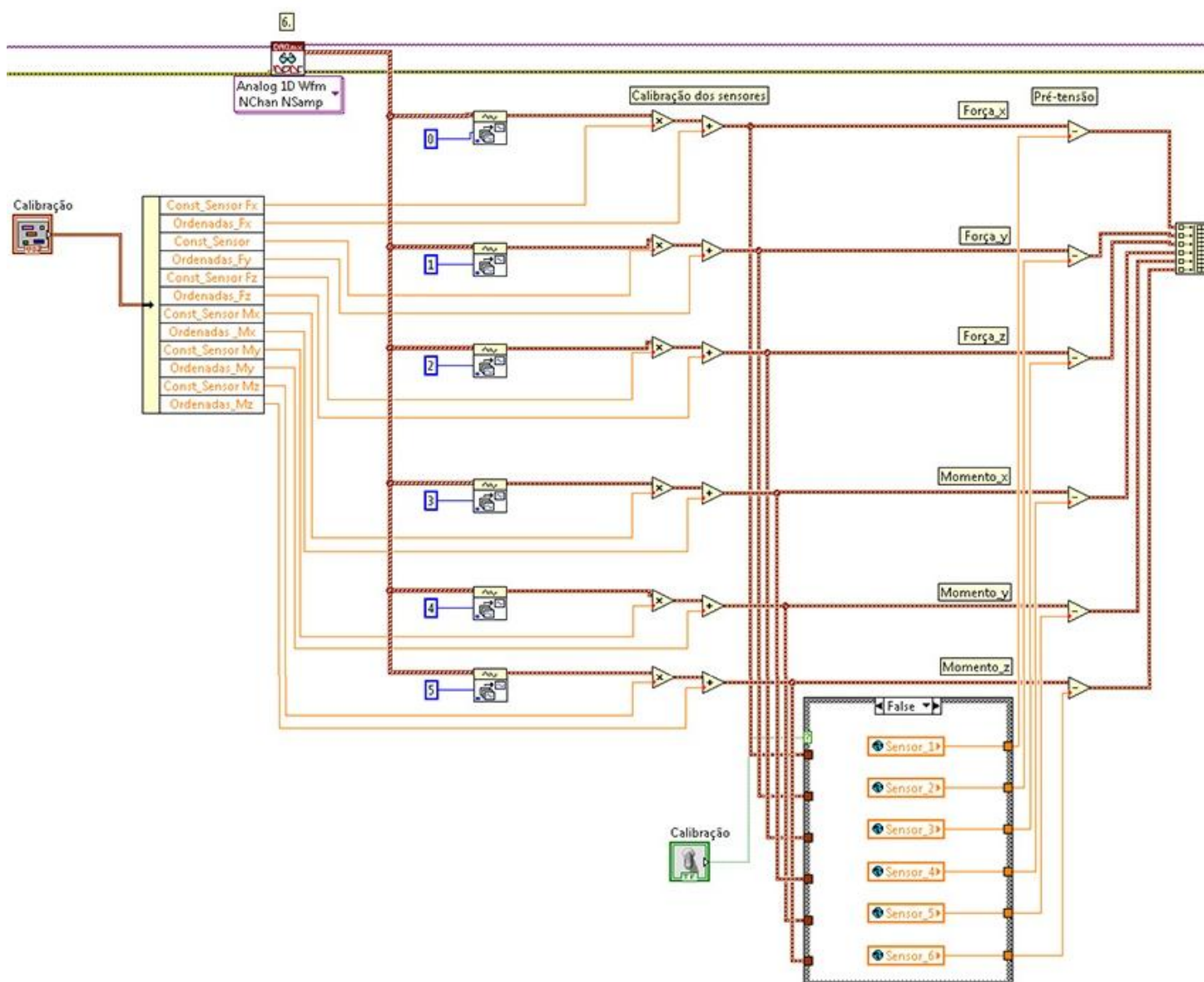


Figura 5.3 – Secção 1 do Diagrama de Blocos

Na primeira secção do programa (Figura 5.3) são definidos os canais virtuais a ler, estes canais estão associados aos canais físicos da placa através do *software Measurement & Automation* (blocos 1 e 2). São definidas a frequência de amostragem e o número de amostras a registar em cada canal (blocos 3 e 4). No bloco 5 dá-se o início à recolha de dados.

Na secção da Figura 5.4 a informação global recebida pelos seis canais é separada, para que cada componente possa ser tratada individualmente. Este procedimento é crucial uma vez que pretendemos obter valores de cada componente da força e do momento individualmente. Seguidamente é necessário proceder-se à calibração de cada bloco de sensores. Esta calibração faz-se em duas fases distintas:

1. As extensões registadas são convertidas em força (N) ou momento (N/m), consoante o canal de medição esteja associado a uma força ou momento.
2. A segunda calibração obriga a que os valores das medições de cada canal sejam zero, sempre que não esteja aplicado nenhum esforço sobre o sensor. Esta calibração é controlada pelo utilizador através de um interruptor no painel frontal.



**Figura 5.4 – Secção 2 do Diagrama de Blocos**

Na última secção do programa (Figura 5.5) os dados da matriz são separados e construídos dois gráficos, um gráfico associado às componentes de força e outro aos momentos. Estes gráficos são os representados no painel frontal. Uma vez que este programa foi utilizado para ensaios estáticos, optou-se por calcular uma média do valor das forças e momentos. Estas médias são guardadas em ficheiro, caso o utilizador o pretenda.



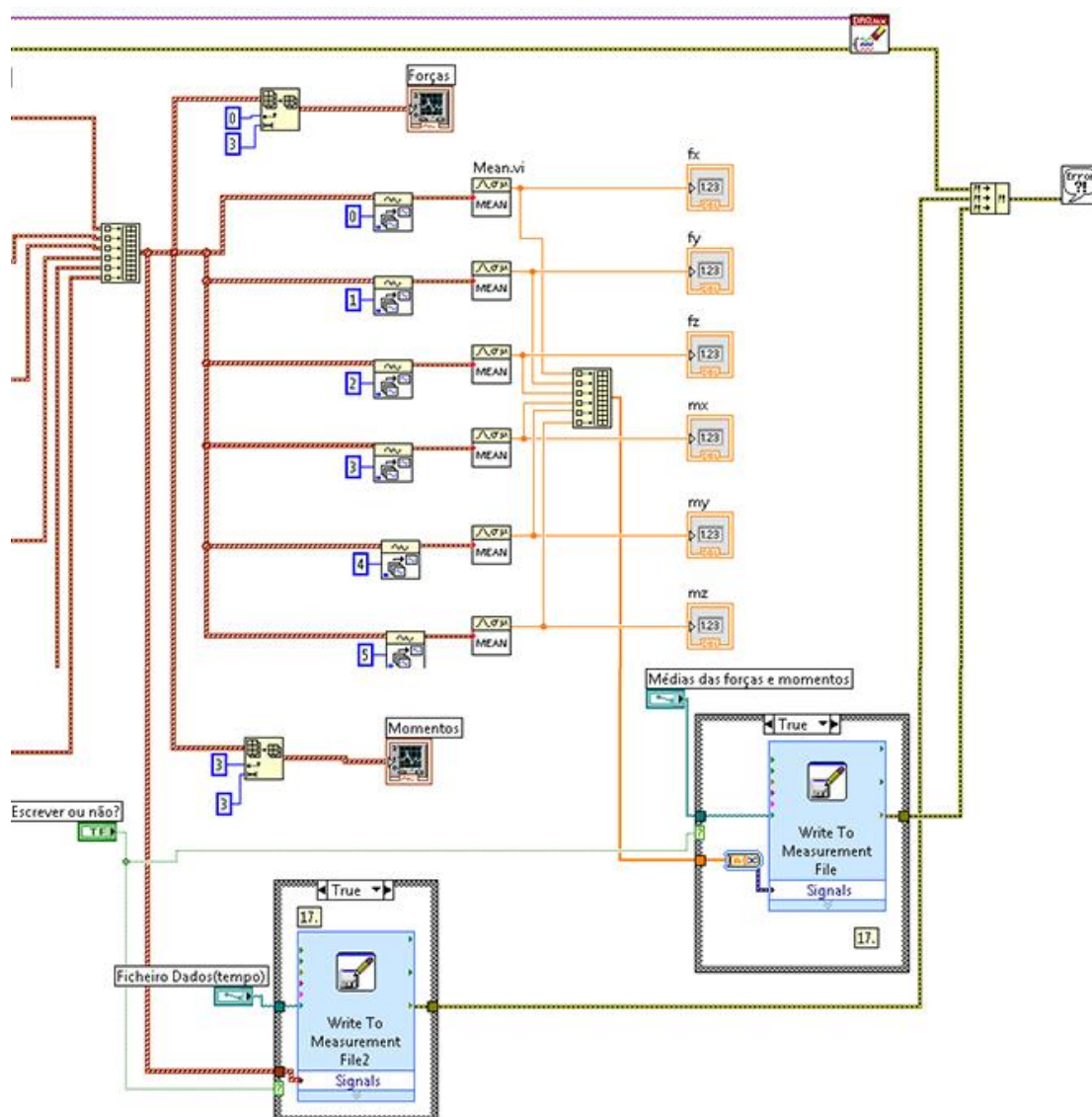


Figura 5.5 – Secção 3 do Diagrama de Blocos



## 5.4. Alterações ao sensor

Foram adicionados à estrutura do sensor 3 braçadeiras com anilhas que permitem a aplicação de forças segundo as componentes x e y, as braçadeiras foram colocadas de forma a ficarem centradas com o plano de simetria da estrutura do sensor.

## 5.5. Ensaio de Calibração

Com o intuito de garantir uma aplicação de esforços puros nas várias componentes aparafusou-se o sensor a um pórtico (Figura 5.6). Garante-se assim que a posição do sensor não se altera durante os ensaios de calibração e de testes.

Foi definido o sistema de eixos coordenados, que se observa na Figura 5.6.

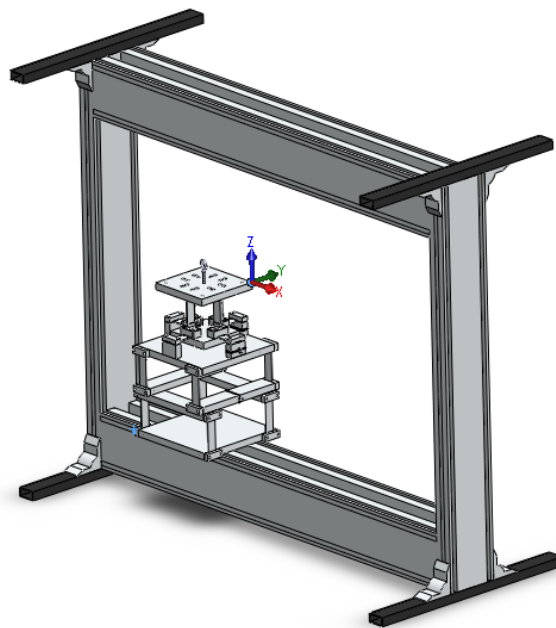


Figura 5.6 – Sistema de eixos coordenados definidos

### 5.5.1. Procedimento dos ensaios

- **Ensaio de Força**

Cada ensaio de carga e descarga consistiu na aplicação de 8 esforços diferentes ao sensor, utilizou-se para isso várias combinações de massas. Os carregamentos aplicados nos ensaios de carga estão descritos na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de forças (Carga)**

Carregamentos Aplicados (Carga) – Ensaios de Força (Kg)			
Carga 1	0	Carga 5	2,0059
Carga 2	0,5117	Carga 6	2,5036
Carga 3	1,0093	Carga 7	3,0038
Carga 4	1,5073	Carga 8	3,5018

**Tabela 5.2 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de forças (Descarga)**

Carregamentos Aplicados (Descarga) – Ensaios de Força (Kg)			
Carga 1	3,5018	Carga 5	1,5073
Carga 2	3,0038	Carga 6	1,0093
Carga 3	2,5036	Carga 7	0,5117
Carga 4	2,0059	Carga 8	0

Na Tabela 5.2 pode-se observar as cargas utilizadas nos ensaios de descarga.

- **Ensaio de Momentos**

Para aplicar momentos puros efectuou-se uma montagem utilizando garrafas de água com as quais, variando a quantidade de água, aplicaram-se 8 esforços diferentes. Foi necessário utilizar alguns componentes adicionais como roldanas, fio e perfis de alumínio. Na Tabela 5.3 e Tabela 5.4 estão representados os carregamentos aplicados nos ensaios de calibração dos momentos de carga e descarga respectivamente, os valores apresentados são a soma dos carregamentos das duas garrafas de água.

**Tabela 5.3 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de momentos (Carga)**

Carregamentos Aplicados (Carga) – Ensaios de Momentos (Kg)			
Carga 1	0	Carga 5	0,4
Carga 2	0,1	Carga 6	0,5
Carga 3	0,2	Carga 7	0,6
Carga 4	0,3	Carga 8	0,7

**Tabela 5.4 – Carregamentos aplicados nos ensaios de calibração de momentos (Descarga)**

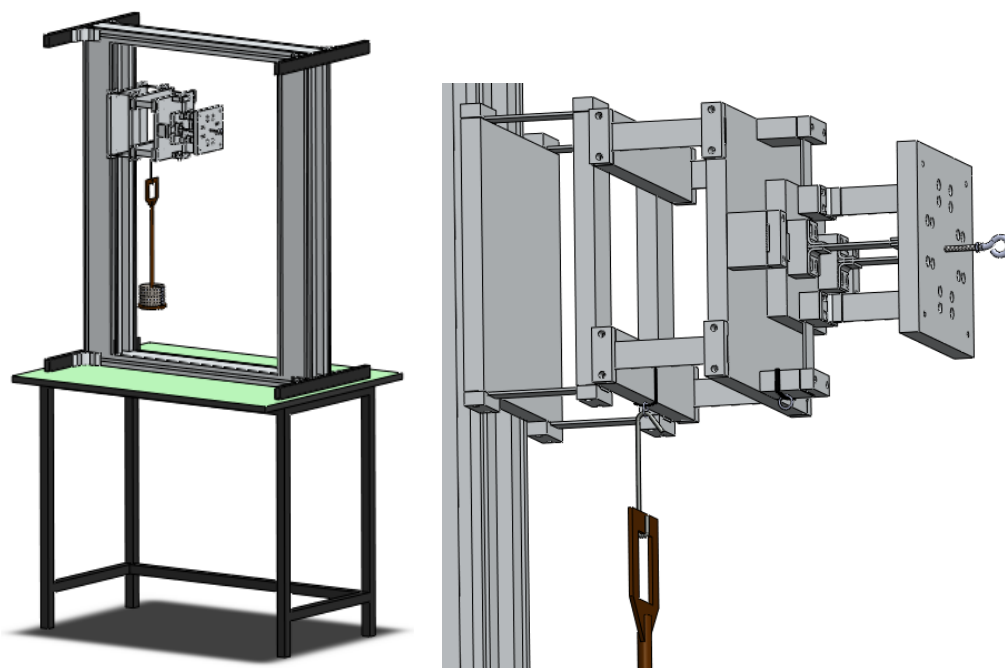
Carregamentos Aplicados (Descarga) – Ensaio de Momentos (Kg)			
Carga 1	0,7	Carga 5	0,3
Carga 2	0,6	Carga 6	0,2
Carga 3	0,5	Carga 7	0,1
Carga 4	0,4	Carga 8	0

### 5.5.2. Calibração $F_x$

Foram efectuados 3 ensaios diferentes para a componente x da força, embora apenas um tenha sido considerado para efeitos de calibração.

- **Ensaio  $F_{x1}$**

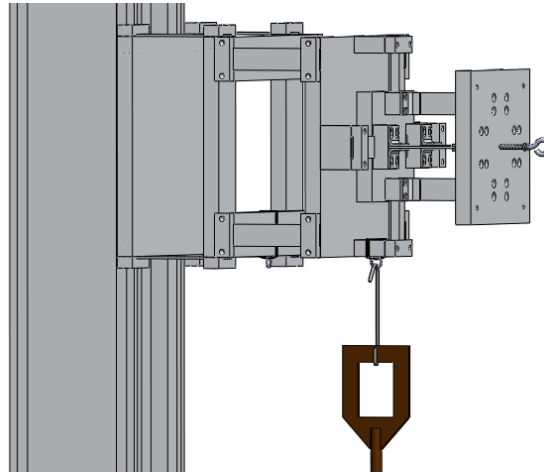
Este ensaio (Figura 5.7) tem o objectivo de definir as extensões verificadas nas várias lâminas do sensor ao aplicar um carregamento no 1º andar do sensor, segundo a componente x da força



**Figura 5.7 – Modelação da montagem do ensaio  $F_{x1}$**

- **Ensaio  $F_{x2}$**

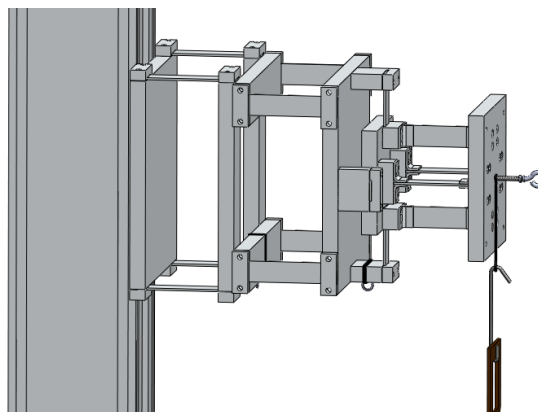
Este ensaio permite obter os valores das extensões verificadas no sensor ao aplicar o carregamento no 2º andar segundo a componente x da força (Figura 5.8). Comparando estas extensões com as do ensaio anterior é possível verificar qual a interferência provocada pela adição de um andar.



**Figura 5.8 – Modelação da montagem do ensaio  $F_{x2}$**

- **Ensaio  $F_{x3}$**

Este ensaio permite verificar o valor das extensões nas várias lâminas do sensor quando se aplica um carregamento segundo a componente x da força no plano da plataforma superior do sensor. Para efeitos do cálculo da matriz de calibração foi este o ensaio utilizado. Na Figura 5.9 é possível observar um pormenor da modelação da montagem.



**Figura 5.9 – Modelação da montagem do ensaio  $F_{x3}$**

### 5.5.3. Calibração $F_y$

- **Ensaio  $F_{y1}$**

Neste ensaio pretende-se verificar as extensões impostas ao sensor, ao aplicar um carregamento segundo a componente y da força no 2º andar (Figura 5.10 e 5.11).

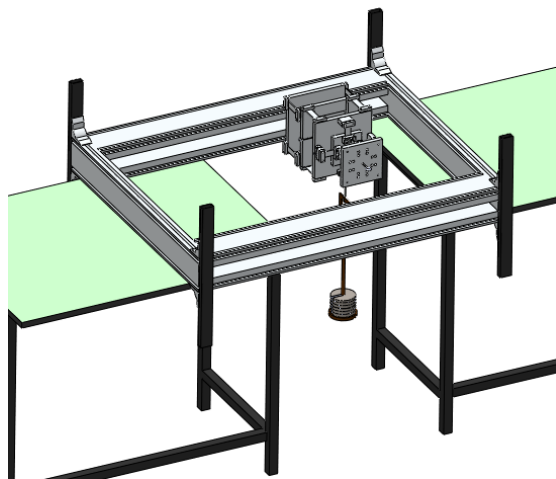


Figura 5.10 – Modelação da montagem do ensaio  $F_{y1}$

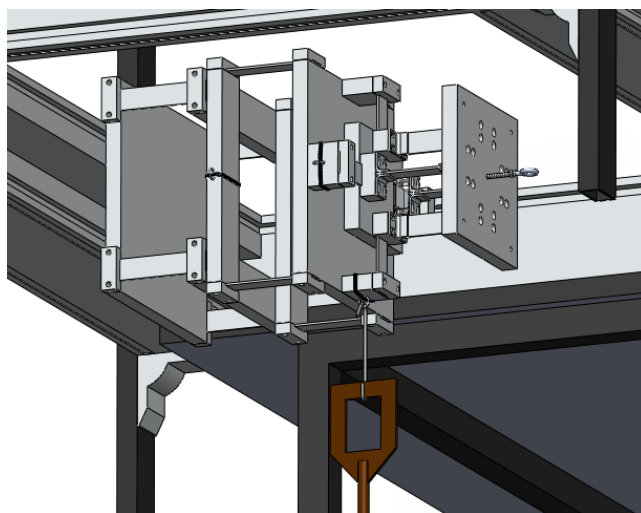
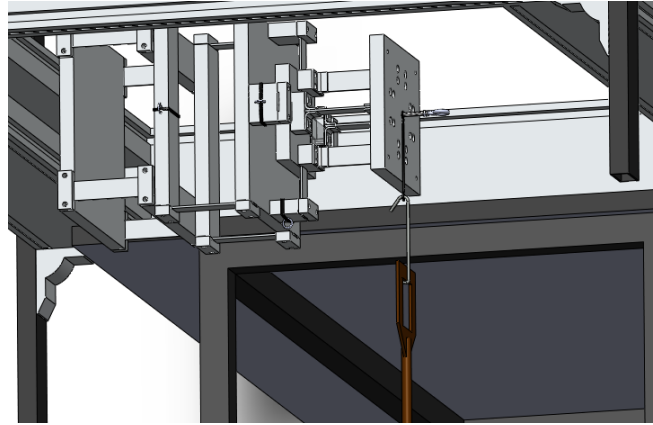


Figura 5.11 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $F_{y1}$

- **Ensaio  $F_{y2}$**

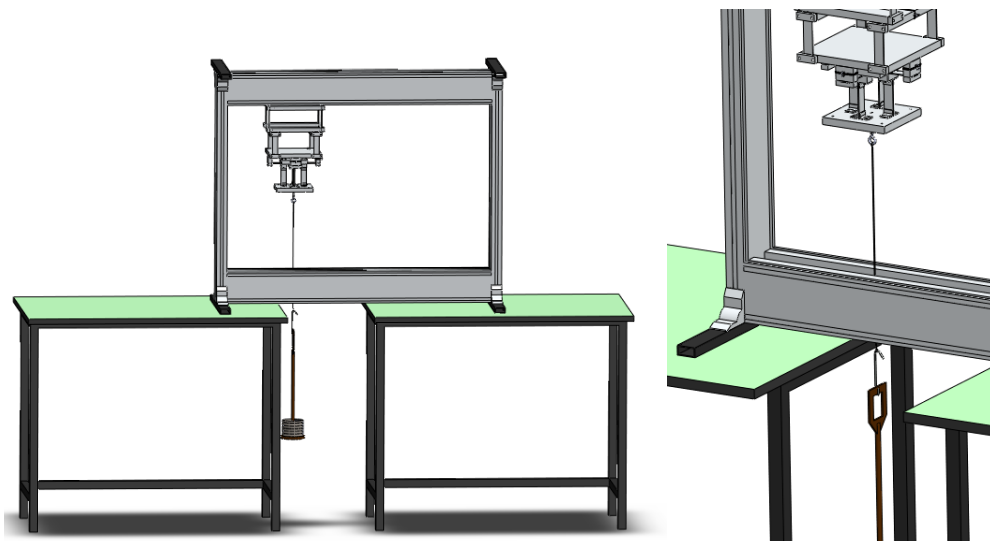
Para efeitos de calibração foi realizado o ensaio  $F_{y2}$ , o esforço é aplicado no plano da base superior do sensor como se pode observar na Figura 5.12.



**Figura 5.12 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $F_{y2}$**

#### **5.5.4. Calibração $F_z$**

O ensaio de calibração da componente da força  $z$  foi conseguido utilizando a montagem da Figura 5.13, invertendo o pórtico é possível aplicar um esforço de componente vertical.



**Figura 5.13 – Modelação da montagem do ensaio  $F_z$**

### 5.5.5. Calibração $M_x$

Na Figura 5.14 observa-se a montagem utilizada para calibrar a componente  $M_x$  do sensor. Este ensaio permite a aplicação de um binário segundo o eixo x, recorreu-se para isso à aplicação de duas componentes verticais da força com valores simétricos. A garrafa do lado esquerdo da figura provoca uma força negativa segundo o eixo z.

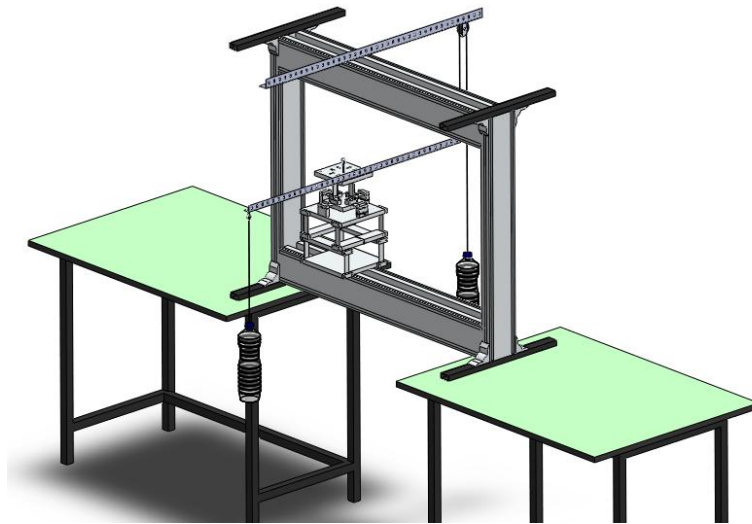


Figura 5.14 – Modelação da montagem do ensaio  $M_x$

Na Figura 5.15 é possível observar o sistema de roldana utilizado para provocar uma componente vertical da força segundo a direcção z com sentido positivo. De forma a reduzir o efeito do atrito entre a roldana e o fio, o conjunto foi lubrificado. Demonstrando alterações muito significativas.

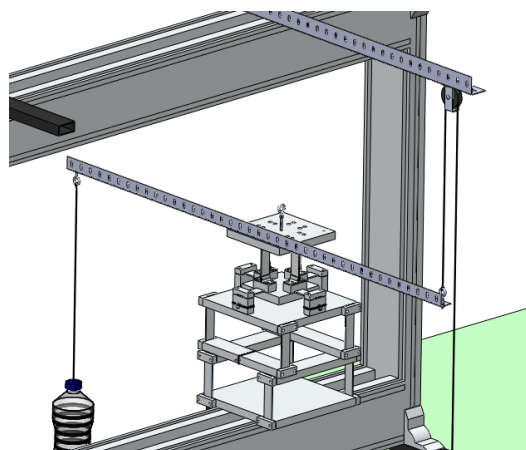
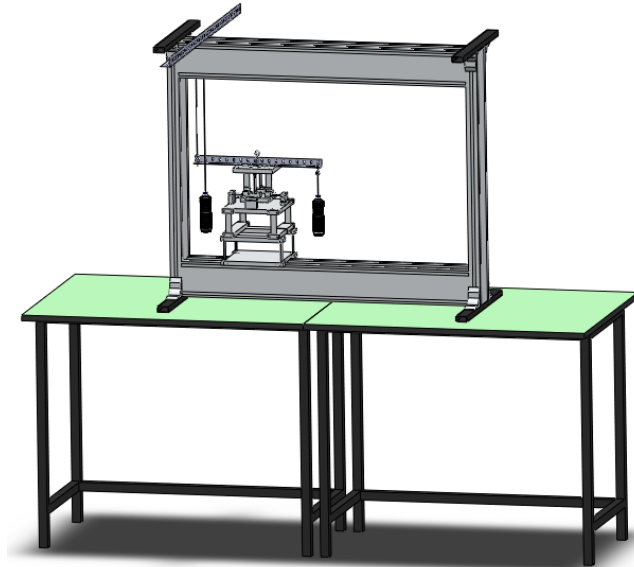


Figura 5.15 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $M_x$

A acção deste binário de forças provoca um binário positivo segundo o eixo x.

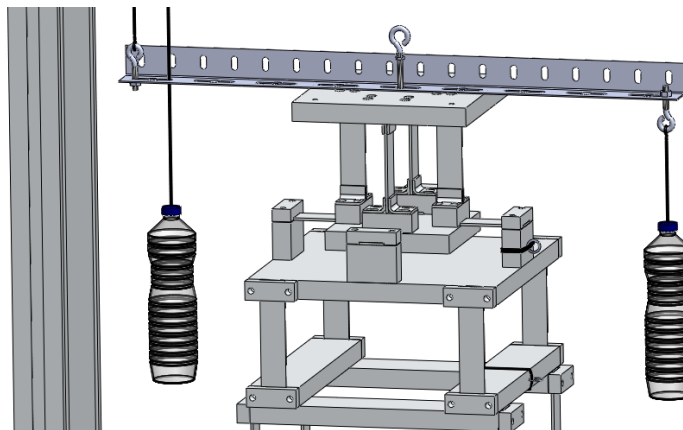
### 5.5.6. Calibração $M_y$

Para a calibração da componente y do momento foi utilizada a montagem da Figura 5.16, esta montagem permite a aplicação de um binário positivo segundo o eixo y.



**Figura 5.16 – Modelação da montagem do ensaio  $M_y$**

Na Figura 5.17 verifica-se o binário de forças aplicado ao sensor, a garrafa da esquerda provoca uma força de sentido positivo segundo o eixo z por outro lado a garrafa da direita na figura aplica uma força negativa segundo o eixo z.



**Figura 5.17 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $M_y$**



### 5.5.7. Calibração $M_z$

A montagem da Figura 5.18 foi utilizada para o ensaio de calibração da componente  $z$  do momento, permite aplicar um binário segundo o eixo  $z$ .

É aplicado um binário de forças, a garrafa do lado esquerdo da figura aplica uma força negativa segundo o eixo  $x$  ao passo que a garrafa do lado direito uma força positiva na mesma direcção.

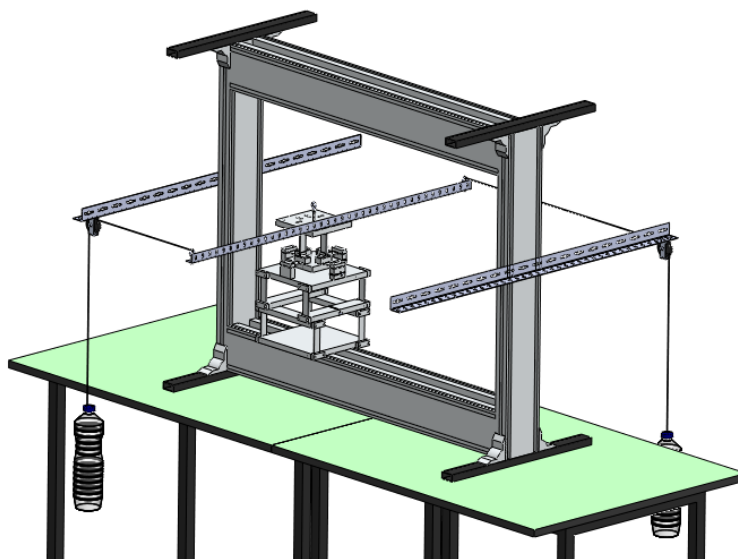


Figura 5.18 – Modelação da montagem do ensaio  $M_z$

## 5.6. Valores de Extensões

Cada ensaio de calibração consiste em 8 ensaios de carga e 8 de descarga, em cada ensaio o sensor regista as extensões provocadas nas seis componentes de força e momentos, na Tabela 5.5 observam-se as extensões registadas nos 8 ensaios de carga ao realizar o ensaio de calibração da componente  $F_{x3}$ .

**Tabela 5.5 – Extensões verificadas no ensaio  $F_{x3}$  nas várias componentes de forças e momentos**

	Ensaio $F_{x3}$ (Carga)					
	Extensão $F_x$	Extensão $F_y$	Extensão $F_z$	Extensão $M_x$	Extensão $M_y$	Extensão $M_z$
Ensaio 1	$3,02 \times 10^{-08}$	$-1,66 \times 10^{-08}$	$-7,05 \times 10^{-09}$	$1,35 \times 10^{-08}$	$-2,20 \times 10^{-08}$	$-2,44 \times 10^{-08}$
Ensaio 2	$4,78 \times 10^{-05}$	$4,20 \times 10^{-07}$	$-8,86 \times 10^{-07}$	$1,16 \times 10^{-07}$	$5,59 \times 10^{-05}$	$8,02 \times 10^{-07}$
Ensaio 3	$9,42 \times 10^{-05}$	$9,25 \times 10^{-07}$	$-1,64 \times 10^{-06}$	$3,33 \times 10^{-07}$	$1,10 \times 10^{-04}$	$1,62 \times 10^{-06}$
Ensaio 4	$1,41 \times 10^{-04}$	$1,31 \times 10^{-06}$	$-2,46 \times 10^{-06}$	$4,12 \times 10^{-07}$	$1,65 \times 10^{-04}$	$2,08 \times 10^{-06}$
Ensaio 5	$1,87 \times 10^{-04}$	$1,75 \times 10^{-06}$	$-3,20 \times 10^{-06}$	$4,61 \times 10^{-07}$	$2,19 \times 10^{-04}$	$2,36 \times 10^{-06}$
Ensaio 6	$2,33 \times 10^{-04}$	$2,16 \times 10^{-06}$	$-4,03 \times 10^{-06}$	$5,96 \times 10^{-07}$	$2,74 \times 10^{-04}$	$2,29 \times 10^{-06}$
Ensaio 7	$2,80 \times 10^{-04}$	$2,60 \times 10^{-06}$	$-4,80 \times 10^{-06}$	$6,64 \times 10^{-07}$	$3,28 \times 10^{-04}$	$3,18 \times 10^{-06}$
Ensaio 8	$3,26 \times 10^{-04}$	$3,07 \times 10^{-06}$	$-5,65 \times 10^{-06}$	$7,61 \times 10^{-07}$	$3,83 \times 10^{-04}$	$2,90 \times 10^{-06}$

Para cada ensaio de calibração registaram-se as extensões em cada componente da força e do momento, assim obtiveram-se 18 tabelas semelhantes à anterior, 9 ensaios de carga e 9 de descarga, estas tabelas encontram-se no Anexo A.

## 5.7. Cálculo da Matriz de Calibração Experimental

O cálculo da matriz de calibração experimental foi efectuado segundo o procedimento adoptado previamente no cálculo da matriz de calibração teórica. Após a obtenção dos valores de extensão nos vários ensaios de calibração, utilizaram-se os métodos dos declives e dos mínimos quadrados para obter a matriz de calibração.

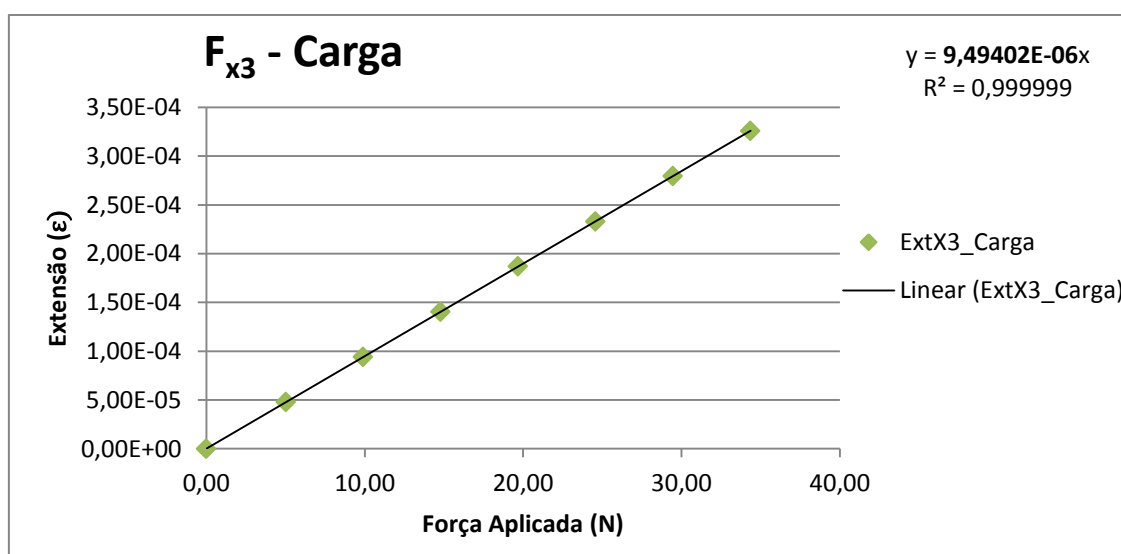
### 5.7.1. Método dos declives

Como referido na secção 2.3.1, este método consiste em construir uma regressão linear com os 8 ensaios realizados para cada calibração, o declive da regressão de cada componente da força é um elemento da matriz de declives. A matriz de calibração é calculada invertendo a matriz de declives.

**Tabela 5.6 – Extensões verificadas nas lâminas da componente x da força, nos ensaios realizados**

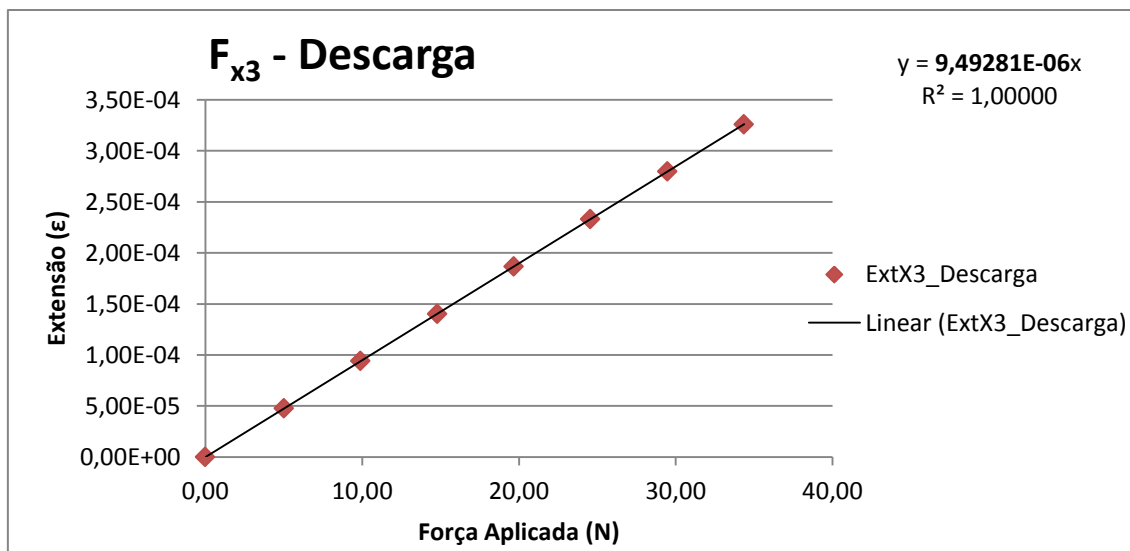
	CARGA		DESCARGA	
	Extensão $F_{x3}$	Força $F_{x3}$	Extensão $F_{x3}$	Força $F_{x3}$
Ensaio 1	0	0	$3,26 \times 10^{-04}$	34,35
Ensaio 2	$4,78 \times 10^{-05}$	5,02	$2,80 \times 10^{-04}$	29,47
Ensaio 3	$9,42 \times 10^{-05}$	9,90	$2,33 \times 10^{-04}$	24,56
Ensaio 4	$1,40 \times 10^{-04}$	14,79	$1,87 \times 10^{-04}$	19,68
Ensaio 5	$1,87 \times 10^{-04}$	19,68	$1,40 \times 10^{-04}$	14,79
Ensaio 6	$2,33 \times 10^{-04}$	24,56	$9,40 \times 10^{-05}$	9,90
Ensaio 7	$2,80 \times 10^{-04}$	29,47	$4,77 \times 10^{-05}$	5,02
Ensaio 8	$3,26 \times 10^{-04}$	34,35	0	0

Na Tabela 5.6 pode-se observar o valor das extensões verificadas nas lâminas da componente x da força, ao realizar os 8 ensaios de carga e de descarga  $F_{x3}$ . Para obter a regressão linear entre o valor da força e da extensão, elaborou-se o gráfico da Figura 5.19 para os ensaios de carga e o gráfico da Figura 5.20 com os valores do ensaio de descarga.



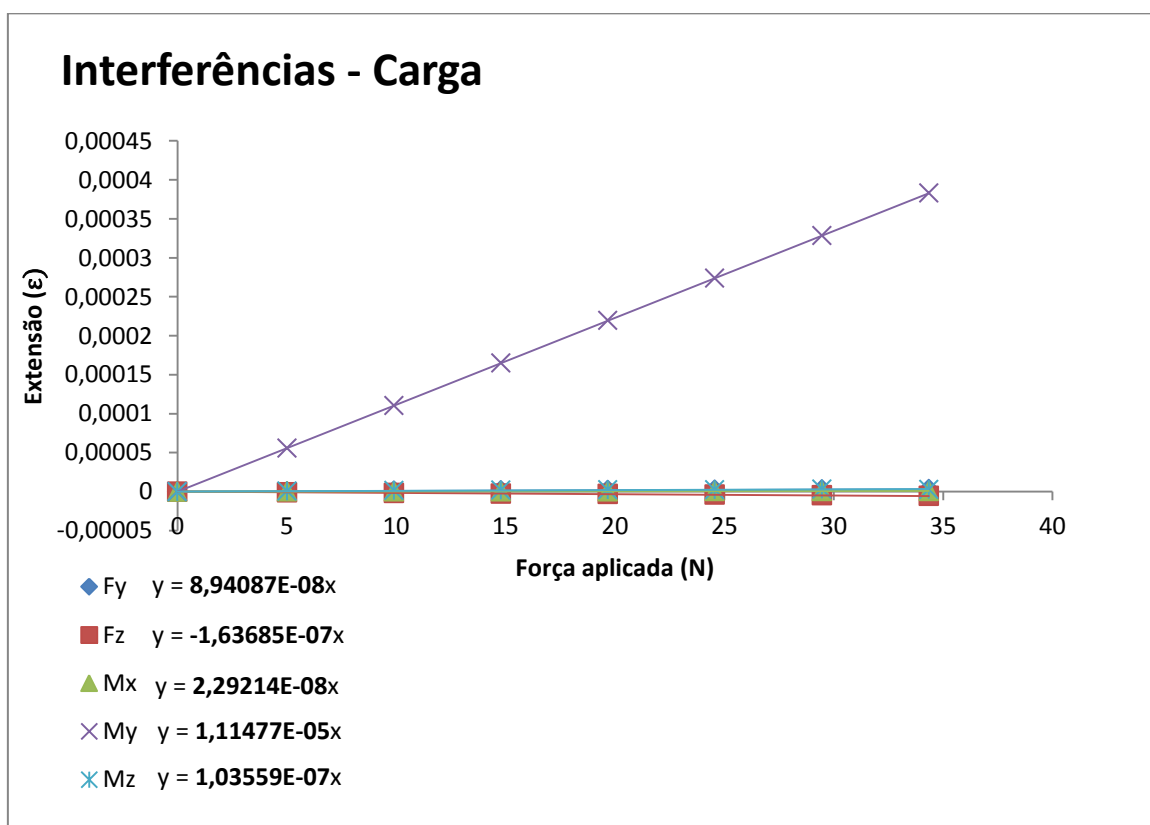
**Figura 5.19 – Gráfico da regressão linear do ensaio de calibração (Carga) da componente  $F_{x3}$**

No eixo das abcissas introduziram-se os valores da força aplicada, no eixo das ordenadas os valores de extensão. Pode-se observar pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que os pontos da série estão muito próximo da recta obtida. Através da equação da recta foi retirado o valor do declive.



**Figura 5.20 – Gráfico da regressão linear do ensaio de calibração (Descarga) da componente F<sub>x3</sub>**

O mesmo procedimento foi adoptado para os ensaios de calibração de descarga, como seria de esperar, o valor do declive é muito semelhante ao dos ensaios de carga.



**Figura 5.21 – Gráfico das regressões lineares das restantes componentes no ensaio de calibração F<sub>x3</sub>**

De forma a obter os declives das restantes componentes da força e momentos, foi elaborado o gráfico da Figura 5.21.

**Tabela 5.7 – Resumo dos Erros de Linearidade e Histerese dos ensaios de calibração experimental**

	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Erro Linearidade (%) (Carga)	0,05	0,04	1,14	0,68	1,20	3,40
Histerese (%)	0,01	2,82	0,46	0,11	0,25	0,10

Na Tabela 5.7, demonstram-se os valores dos erros de linearidade dos ensaios de carga e o valor da histerese. Recorreram-se a estes dois cálculos para comprovar que estes erros eram residuais, o que se constata. Desta forma para a aplicação do método dos declives consideraram-se apenas os valores dos ensaios de carga.

Todo o procedimento descrito foi repetido para os vários ensaios de calibração da secção 5.5, cada coluna da Tabela 5.8 corresponde a um ensaio de calibração diferente.

**Tabela 5.8 – Matriz de declives calculados em cada componente para cada ensaio de calibração**

	$F_{x3}$	$F_{y2}$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$SF_x$	$9,49 \times 10^{-06}$	$1,40 \times 10^{-07}$	$6,39 \times 10^{-08}$	$-1,46 \times 10^{-07}$	$-8,27 \times 10^{-07}$	$1,14 \times 10^{-07}$
$SF_y$	$8,94 \times 10^{-08}$	$9,70 \times 10^{-06}$	$-9,29 \times 10^{-09}$	$1,75 \times 10^{-07}$	$7,22 \times 10^{-07}$	$2,16 \times 10^{-08}$
$SF_z$	$-1,64 \times 10^{-07}$	$-1,80 \times 10^{-07}$	$4,37 \times 10^{-06}$	$1,99 \times 10^{-06}$	$-3,54 \times 10^{-06}$	$-7,14 \times 10^{-09}$
$SM_x$	$2,29 \times 10^{-08}$	$-1,10 \times 10^{-05}$	$-1,64 \times 10^{-07}$	$9,64 \times 10^{-05}$	$4,77 \times 10^{-07}$	$-1,52 \times 10^{-06}$
$SM_y$	$1,11 \times 10^{-05}$	$7,59 \times 10^{-08}$	$-1,87 \times 10^{-07}$	$-1,62 \times 10^{-06}$	$9,39 \times 10^{-05}$	$-2,97 \times 10^{-07}$
$SM_z$	$1,04 \times 10^{-07}$	$-8,70 \times 10^{-08}$	$-1,38 \times 10^{-08}$	$3,66 \times 10^{-07}$	$-4,49 \times 10^{-07}$	$9,33 \times 10^{-05}$

A matriz de declives experimental apresenta grandes semelhanças com a matriz calculado utilizando o modelo teórico (Tabela 4.3).

Na tabela estão representados a azul os elementos da diagonal, e a vermelho as principais interferências, estas são as mesmas encontradas na matriz de declives teórica da Tabela 4.3, traduzindo os acoplamentos esperados entre  $F_x$  e  $M_y$  e entre  $F_y$  e  $M_x$ .

Invertendo a matriz de declives calcula-se a matriz de calibração experimental, apresentada seguidamente:

[K]

$$= \begin{bmatrix} 1,06E+05 & -1,31E+03 & -1,49E+03 & 2,06E+02 & 8,72E+02 & -1,21E+02 \\ -9,61E+01 & 1,03E+05 & 1,78E+02 & -2,03E+02 & -7,84E+02 & -2,95E+01 \\ -6,18E+03 & -9,45E+02 & 2,29E+05 & -4,59E+03 & 8,63E+03 & -2,19E+01 \\ 1,90E+01 & 1,18E+04 & 4,08E+02 & 1,03E+04 & -1,27E+02 & 1,65E+02 \\ -1,24E+04 & 2,73E+02 & 6,40E+02 & 1,44E+02 & 1,06E+04 & 5,11E+01 \\ -1,83E+02 & 5,25E+01 & 3,73E+01 & -4,10E+01 & 5,09E+01 & 1,07E+04 \end{bmatrix}$$

Na Figura 5.22 mostram-se os gráficos de interferência obtidos nos diversos ensaios de calibração, onde é possível observar o acoplamento entre as componentes  $F_x / M_y$  e  $F_y / M_x$ . No ensaio  $F_z$ , por exemplo, não são detectadas interferências muito significativas.

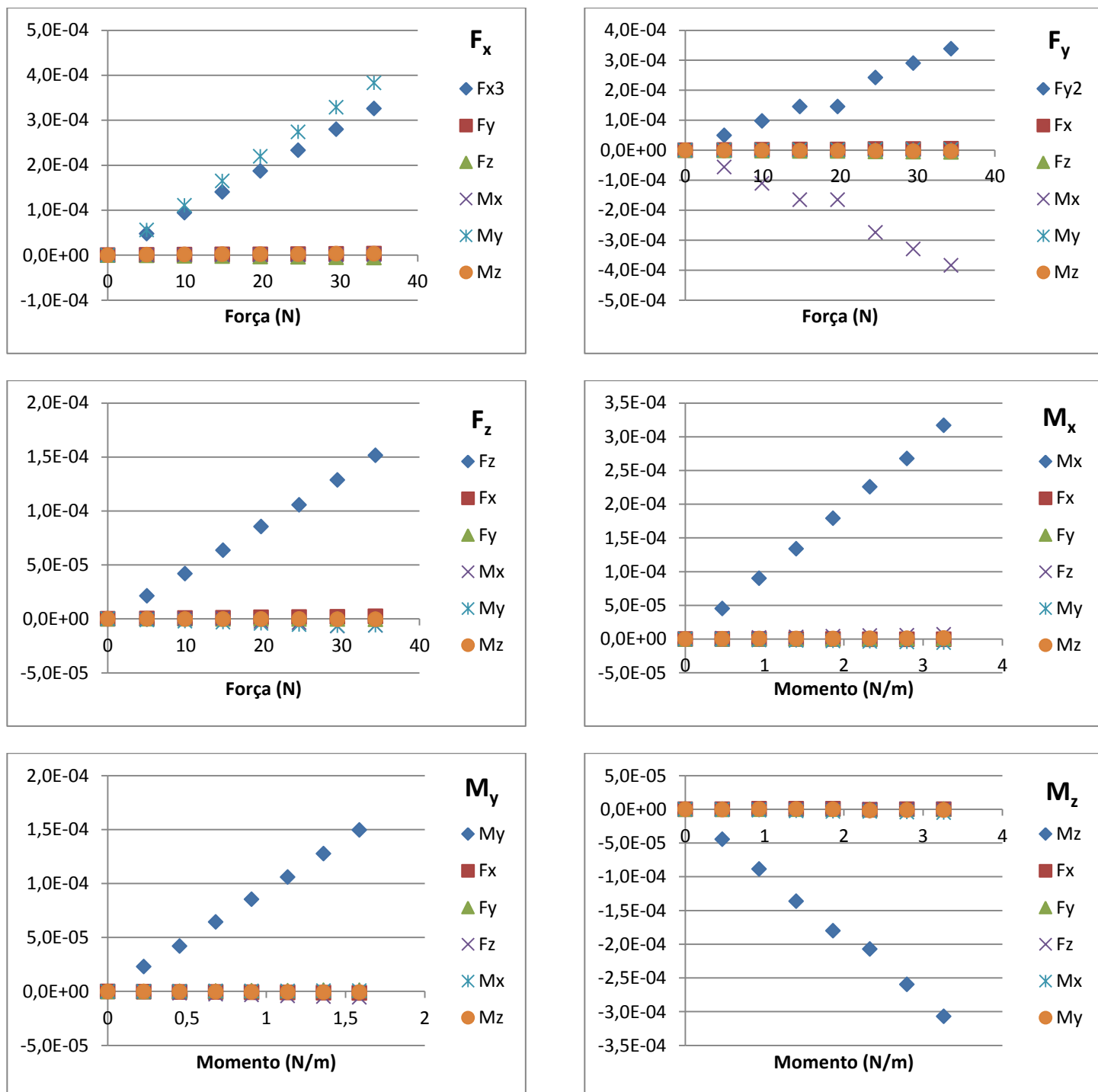


Figura 5.22 – Gráficos de Interferências dos diferentes ensaios de calibração realizados

### 5.7.2. Método dos Mínimos Quadrados

Para calcular a matriz de calibração pelo método dos mínimos quadrados, efectuou-se o cálculo matricial da Eq.6.

$$[K] = [F]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T ([\epsilon]_{\text{calib}} \times [\epsilon]_{\text{calib}}^T)^{-1} \quad (\text{Eq. 6})$$

$[F]_{\text{calib}}$  (Tabela 5.9) é uma matriz de dimensão  $6 \times 84$  que contém os valores das forças e momentos aplicados em cada ensaio de calibração.

**Tabela 5.9 – Matriz  $[F]_{\text{calib}}$  com os valores de forças e momentos aplicados nas direcções ortogonais**

Forças/Momentos												
Fx		Fy		Fz		Mx		My		Mz		
SFx	C A R G A	D	C A R G A	E	C A R G A	S	C A R G A	C	C A R G A	A	C A R G A	D
SFy		E		S		C		A		E		S
SFz		C		A		R		G		A		C
SMx		A		R		G		A		A		A
SMy		R		G		A		A		R		R
SMz		G		A		A		A		A		G

A matriz da Tabela 5.10 é a primeira coluna da matriz  $[F]_{\text{calib}}$ , as restantes colunas são matrizes semelhantes mas correspondentes aos restantes ensaios.

**Nota:** Para efeitos de cálculo não foram considerados os ensaios de força/momento aplicado nulo.

**Tabela 5.10 – Matriz de força aplicada no ensaio  $F_{x3}$  (carga) – 1ª coluna de  $[F]_{\text{calib}}$**

		Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
Ensaio $F_{x3}$ (Carga)	SFx	5,02	9,90	14,79	19,68	24,56	29,47	34,35
	SFy	0	0	0	0	0	0	0
	SFz	0	0	0	0	0	0	0
	SMx	0	0	0	0	0	0	0
	SMy	0	0	0	0	0	0	0
	SMz	0	0	0	0	0	0	0

$[\epsilon]_{\text{calib}}$  (Tabela 5.11) é uma matriz de dimensão  $6 \times 84$  que contém os valores de extensão verificados para a correspondente aplicação da força/momento.

**Tabela 5.11 – Matriz  $[\epsilon]_{\text{calib}}$  das extensões medidas para cada ensaio de calibração realizado**

		Extensões										
		Fx		Fy		Fz		Mx		My		Mz
SFx	C A R G A	D E S C A R G A	C A R G A	D E S C A R G A	C A R G A	D E S C A R G A	C A R G A	D E S C A R G A	C A R G A	D E S C A R G A	C A R G A	D E S C A R G A
SFy												
SFz												
SMx												
SMy												
SMz												

A matriz da Tabela 5.12 é a primeira coluna da matriz  $[\epsilon]_{\text{calib}}$ , as restantes colunas são matrizes semelhantes contendo os valores das extensões verificadas nos restantes ensaios.

**Tabela 5.12 – Matriz de extensões verificadas no ensaio  $F_{x3}$  (carga) – 1ª coluna de  $[\epsilon]_{\text{calib}}$**

		Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
Ensaio $F_{x3}$ (Carga)	SFx	$4,78 \times 10^{-05}$	$9,42 \times 10^{-05}$	$1,41 \times 10^{-04}$	$1,87 \times 10^{-04}$	$2,33 \times 10^{-04}$	$2,80 \times 10^{-04}$	$3,26 \times 10^{-04}$
	SFy	$4,20 \times 10^{-07}$	$9,25 \times 10^{-07}$	$1,31 \times 10^{-06}$	$1,75 \times 10^{-06}$	$2,16 \times 10^{-06}$	$2,60 \times 10^{-06}$	$3,07 \times 10^{-06}$
	SFz	$-8,86 \times 10^{-07}$	$-1,64 \times 10^{-06}$	$-2,46 \times 10^{-06}$	$-3,20 \times 10^{-06}$	$-4,03 \times 10^{-06}$	$-4,80 \times 10^{-06}$	$-5,65 \times 10^{-06}$
	SMx	$1,16 \times 10^{-07}$	$3,33 \times 10^{-07}$	$4,12 \times 10^{-07}$	$4,61 \times 10^{-07}$	$5,96 \times 10^{-07}$	$6,64 \times 10^{-07}$	$7,61 \times 10^{-07}$
	SMy	$5,59 \times 10^{-05}$	$1,10 \times 10^{-04}$	$1,65 \times 10^{-04}$	$2,19 \times 10^{-04}$	$2,74 \times 10^{-04}$	$3,28 \times 10^{-04}$	$3,83 \times 10^{-04}$
	SMz	$8,02 \times 10^{-07}$	$1,62 \times 10^{-06}$	$2,08 \times 10^{-06}$	$2,36 \times 10^{-06}$	$2,29 \times 10^{-06}$	$3,18 \times 10^{-06}$	$2,90 \times 10^{-06}$

Recorrendo ao programa *Matlab* para inversão, transposição das matrizes e cálculo matricial da Eq.6, determinou-se a matriz de calibração  $[K]$ .

$[K]$

$$= \begin{bmatrix} 1,04E+05 & -1,28E+03 & -1,48E+03 & 2,25E+02 & 8,84E+02 & 1,05E+02 \\ -5,65E+01 & 1,02E+05 & 1,88E+02 & -1,95E+02 & -7,63E+02 & 1,86E+01 \\ -6,13E+03 & -8,69E+02 & 2,29E+05 & -4,53E+03 & 8,59E+03 & -1,76E+00 \\ 2,09E+01 & 1,18E+04 & 4,17E+02 & 1,03E+04 & -1,25E+02 & -1,66E+02 \\ -1,24E+04 & -1,28E+03 & 6,38E+02 & 1,45E+02 & 1,06E+04 & -5,02E+01 \\ -1,84E+02 & 5,24E+01 & 3,72E+01 & -4,09E+01 & 5,29E+01 & 1,07E+04 \end{bmatrix}$$

Como previsto esta matriz é muito semelhante à matriz de calibração experimental calculada seguindo o método dos declives.



## 5.8. Validação da matriz de calibração experimental

Após o cálculo das matrizes de calibração experimentais foram efectuados ensaios de teste experimentais para comprovar a eficácia das matrizes. Realizaram-se três tipos de ensaios: aplicação de uma força, de um momento e de um esforço combinado.

Nesta secção apresentam-se as montagens dos ensaios práticos, os valores das extensões medidas e o cálculo dos esforços através das matrizes de calibração. Avaliam-se os erros obtidos e comparam-se as eficácias dos dois métodos de calibração.

### 5.8.1. Ensaios de aplicação de forças

Em cada ensaio de teste foram realizadas três medições de diferentes intensidades de força, para isso recorreu-se a um conjunto de massas de teste, na Tabela 5.13 estão representados os valores dos esforços.

**Tabela 5.13 – Esforços aplicados em ensaios de força em todas as direcções**

	Esforços Aplicados		
	1º Carregamento	2º Carregamento	3º Carregamento
Força	14,8474 (N)	24,6457 (N)	34,4341 (N)

As montagens utilizadas para estes ensaios foram as utilizadas nos ensaios de calibração das forças na secção 5.5.

Nas seguintes tabelas pode-se observar os valores dos esforços calculados através da Eq. 5, tal como foi efectuado com os ensaios do modelo teórico na secção 4.7. Na Tabela 5.14 os valores medidos foram calculados utilizando a matriz de calibração do método dos declives, observa-se que o maior erro é inferior a 2%

**Tabela 5.14 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_y$  (Método dos declives)**

	Medições $F_y$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
<b>SF<sub>x</sub></b>	-0,03	0	0,03	-0,06	0	0,06	-0,08	0	0,08
<b>SF<sub>y</sub></b>	15,07	14,85	0,23	25,04	24,65	0,39	34,94	34,43	0,51
<b>SF<sub>z</sub></b>	-0,04	0	0,04	0,02	0	0,02	0,06	0	0,06
<b>SM<sub>x</sub></b>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00
<b>SM<sub>y</sub></b>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
<b>SM<sub>z</sub></b>	0,00	0	0,00	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04

**Erro  $F_y$  (%):** 1,53

**Erro  $F_y$  (%):** 1,60

**Erro  $F_y$  (%):** 1,48

Efectuou-se o mesmo cálculo utilizando a matriz de calibração do método dos mínimos quadrados (Tabela 5.15).

Os erros calculados são ligeiramente inferiores aos calculados através do método dos declives.

**Tabela 5.15 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_y$  (Método dos Mínimos Quadrados)**

	Medições $F_y$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
<b>SF<sub>x</sub></b>	-0,03	0	0,03	-0,06	0	0,06	-0,08	0	0,08
<b>SF<sub>y</sub></b>	15,02	14,85	0,18	24,95	24,65	0,31	34,82	34,43	0,39
<b>SF<sub>z</sub></b>	-0,04	0	0,04	0,03	0	0,03	0,07	0	0,07
<b>SM<sub>x</sub></b>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00
<b>SM<sub>y</sub></b>	-0,23	0	0,23	-0,38	0	0,38	-0,53	0	0,53
<b>SM<sub>z</sub></b>	0,00	0	0,00	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04

**Erro  $F_y$  (%):** 1,18

**Erro  $F_y$  (%):** 1,25

**Erro  $F_y$  (%):** 1,13

Este procedimento foi repetido para as componentes  $F_x$  e  $F_y$ , as tabelas de resultados encontram-se no Anexo C.

### 5.8.2. Ensaio de aplicação de momentos

Para cada ensaio de teste de momentos, tal como tinha sido efectuado nos ensaios de força, realizaram-se três medições com diferentes intensidades de esforço aplicado. As montagens utilizadas para os ensaios de teste foram as utilizadas nos ensaios de calibração e as cargas aplicadas nas garrafas estão descritas na Tabela 5.16.

**Tabela 5.16 – Cargas aplicadas nos ensaios de teste de momentos em todas as direcções**

	Cargas Aplicadas (Par de garrafas)		
	1º Ensaio	2º Ensaio	3 º Ensaio
Momento	0,2 (Kg)	0,4 (Kg)	0,6 (Kg)

Recorrendo ao método descrito na subsecção anterior calculou-se o valor dos esforços experimentais. Comparando os valores medidos e reais é possível determinar o erro de medição, na Tabela 5.17 e Tabela 5.18 apresentam-se estes dados para o método dos declives e dos mínimos quadrados respectivamente.

**Tabela 5.17 - Resumo dos esforços e erros do ensaio  $M_x$  (Método dos declives)**

	Medições M <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03		
SF <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01		
SF <sub>z</sub>	-0,03	0	0,03	-0,02	0	0,02	-0,04	0	0,04		
SM <sub>x</sub>	0,94	0,93	0,00	1,86	1,86	0,01	2,78	2,80	0,02		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro M <sub>x</sub> (%):			0,39	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,42	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,73

**Tabela 5.18 – Resumo dos esforços e erros do ensaio  $M_x$  (Método dos Mínimos Quadrados)**

	Medições M <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02		
SF <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SF <sub>z</sub>	-0,02	0	0,02	-0,01	0	0,01	-0,03	0	0,03		
SM <sub>x</sub>	0,94	0,93	0,00	1,86	1,86	0,01	2,77	2,80	0,02		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro M <sub>x</sub> (%):			0,36	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,44	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,76

Utilizando o método dos mínimos quadrados o valor do erro é inferior no 1º Ensaio mas superior nos restantes. Constata-se que os valores dos erros são todos inferiores a 1% verificando a eficácia dos dois métodos.

As restantes tabelas dos ensaios do momento encontram-se no Anexo C.

### 5.8.3. Ensaio de aplicação de esforços combinados

Para garantir a eficácia da matriz de calibração efectuaram-se ainda ensaios de aplicação de esforços combinados, com o intuito de averiguar se o sensor determina correctamente o valor do esforço sofrido nas diferentes componentes da força e momentos quando aplicados em simultâneo. Para isso realizaram-se diferentes ensaios que resultam das várias montagens descritas nesta secção.

- **Medição  $F_x, M_y$**

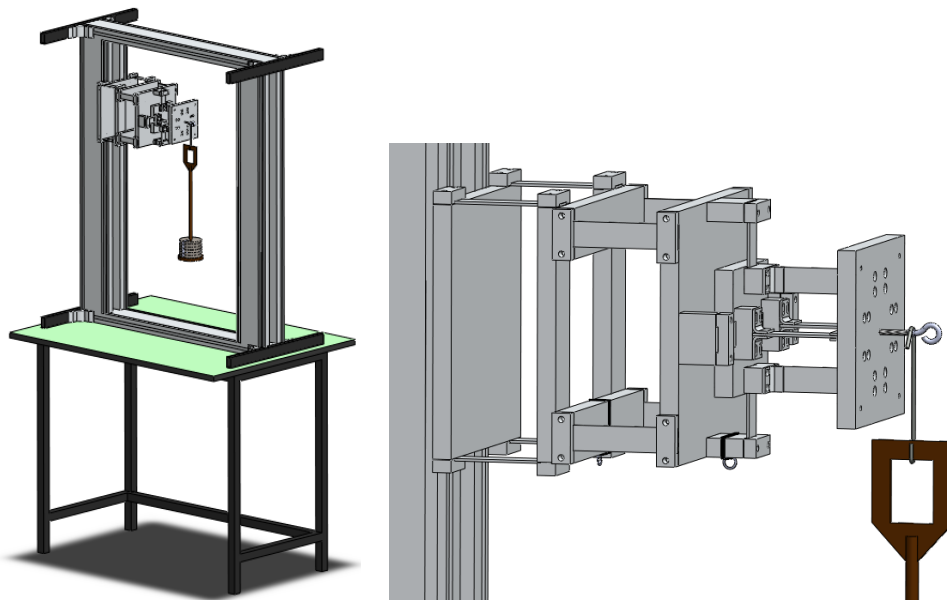


Figura 5.23 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x, M_y$

Neste ensaio de teste a força é aplicada a uma distância do plano superior do sensor (Figura 5.23), provocando uma componente de momento de valor  $M_y = F_x \times b$ .

- **Medição  $F_y, M_x$**

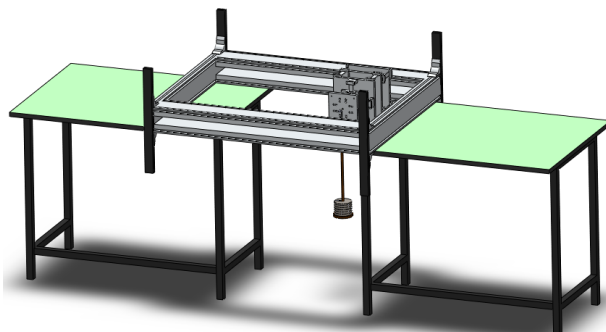


Figura 5.24 – Modelação da montagem do ensaio  $F_y, M_x$

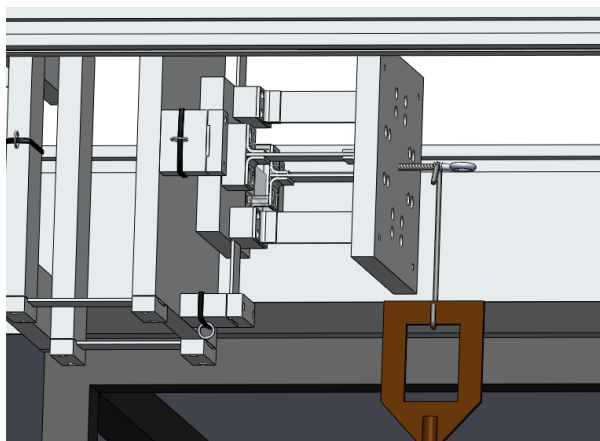


Figura 5.25 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $F_y, M_x$

No ensaio da Figura 5.24 a força foi aplicada segundo o eixo y a  $x$  cm do plano superior do sensor, provocando uma componente x do momento de valor  $M_x = F_y \times b$

- **Medição  $F_x, M_z$**

No ensaio representado na Figura 5.26 aplicou-se uma componente x da força que, tendo em conta o ponto de aplicação, provoca uma componente z do momento (valor negativo).

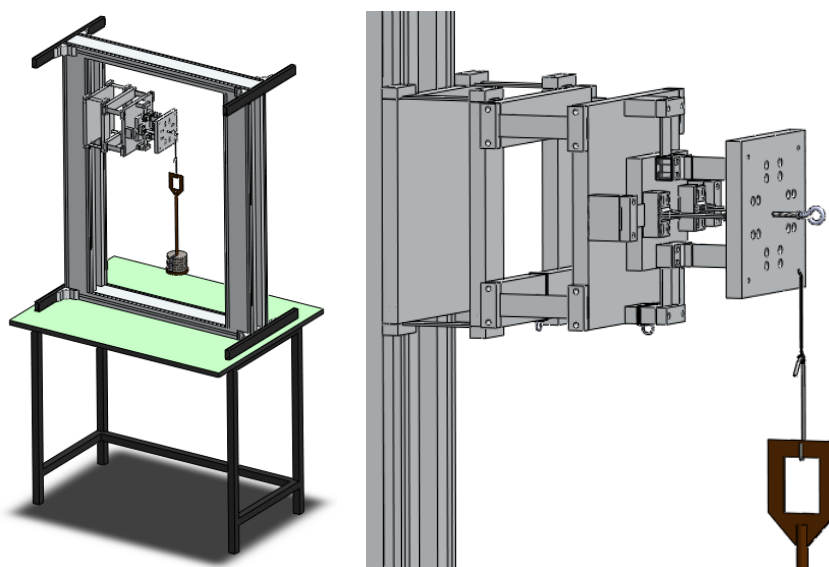


Figura 5.26 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x, M_z$

- Medição  $F_y, M_z$

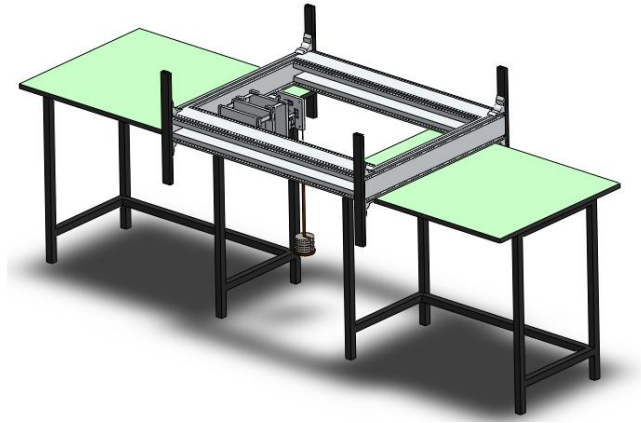


Figura 5.27 – Modelação da montagem do ensaio  $F_y, M_z$

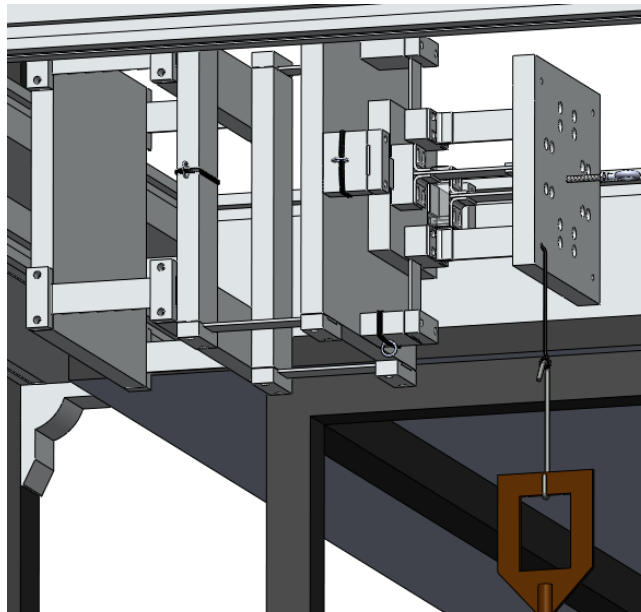
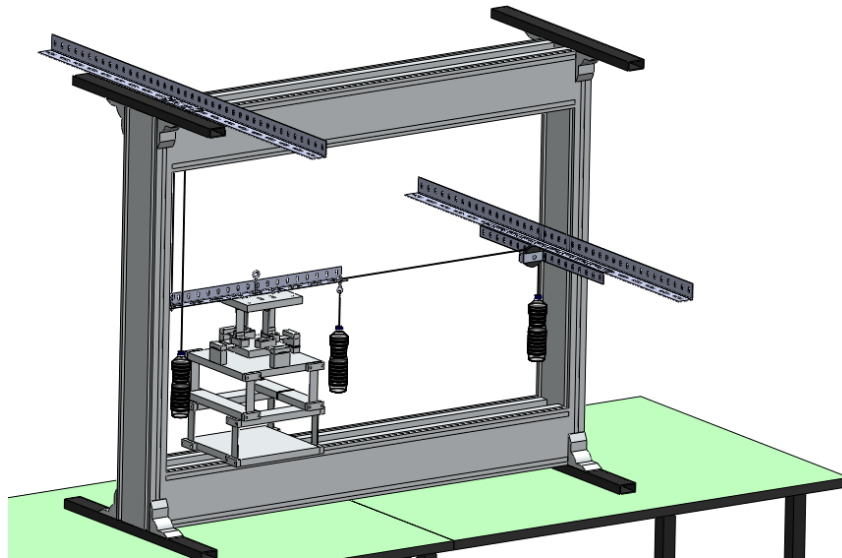


Figura 5.28 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $F_y, M_z$

O ensaio representado anteriormente (Figura 5.27) tem o intuito de, ao aplicar uma componente  $y$  da força, provocar uma componente  $z$  do momento (valor positivo).

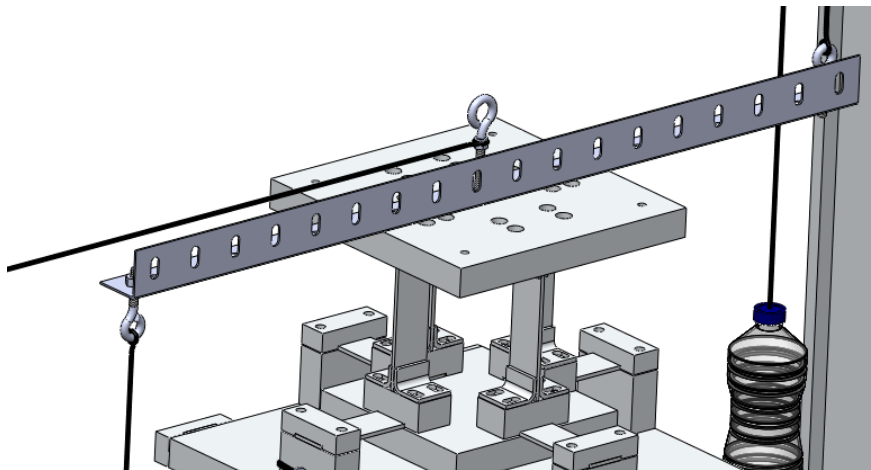
- **Medição  $F_x$ ,  $M_y$  – Independentes (Topo)**

Nos ensaios anteriores a componente do momento é provocada por uma determinada aplicação de força. No ensaio da Figura 5.29 os dois esforços são aplicados separadamente. Representa-se a montagem efectuada onde se observa a aplicação de uma componente  $y$  do momento, tal como no ensaio de calibração e simultaneamente uma força de componente  $x$  no plano da base através de um sistema de roldana.



**Figura 5.29 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x$ ,  $M_y$  – Independentes (Topo)**

- **Medição  $F_x$ ,  $M_y$  – Independentes (Olhal)**



**Figura 5.30 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x$ ,  $M_y$  – Independentes (Olhal)**

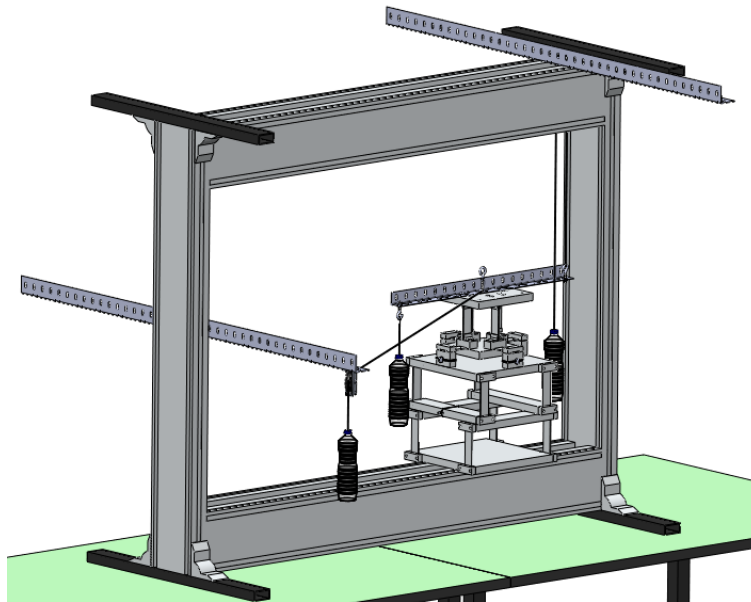
A montagem do ensaio da Figura 5.30 é idêntica à anterior, diferindo apenas o plano de aplicação da força a uma distância do plano superior do sensor, provocando uma componente

y do momento adicional. O valor do momento total aplicado ( $M_y$ ) é a soma do valor do binário puro aplicado ( $M_y'$ ) e o momento provocado pela componente x da força, ou seja:

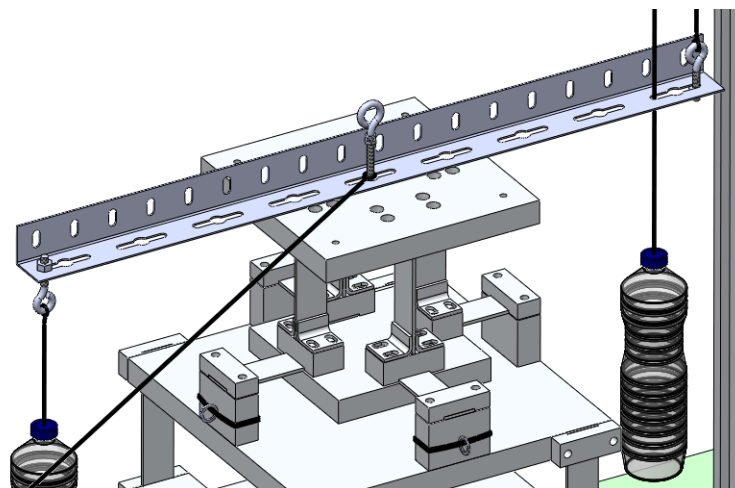
$$M_y = M_y' + F_x \times b$$

- **Medição  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_y$  – Topo**

O ensaio descrito na montagem da Figura 5.31 tem como objectivo aplicar, no plano da base, uma força com componente x e y. Simultaneamente foi aplicado um binário em y.



**Figura 5.31 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_y$  – Topo**

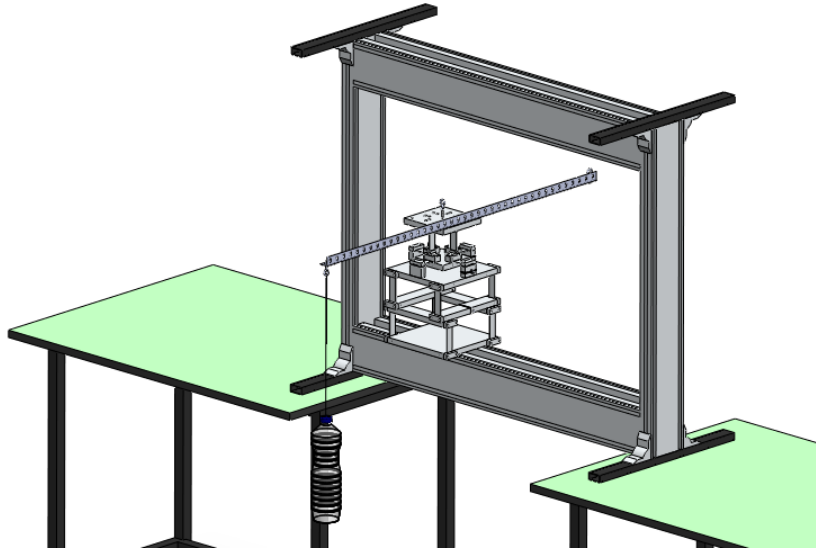


**Figura 5.32 – Pormenor da modelação da montagem do ensaio  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_y$  – Topo**



- **Medição  $F_z, M_x$**

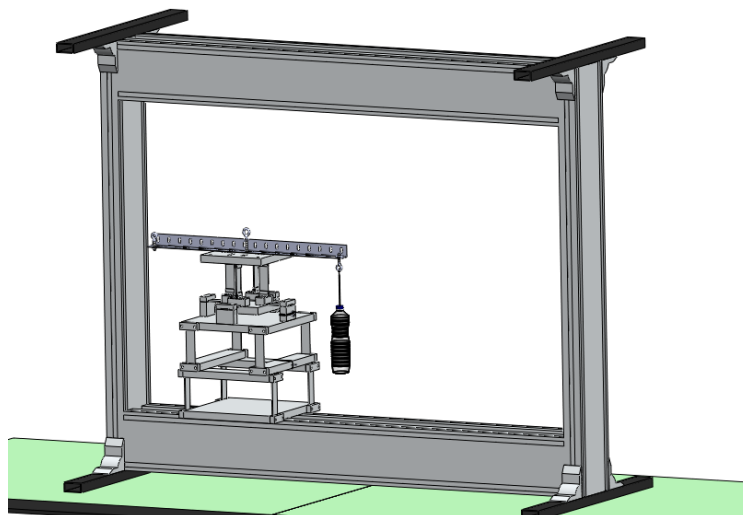
O ensaio seguinte tem o objectivo de caracterizar a interacção entre a componente z da força e a componente x do momento. Foi aplicada uma componente negativa da força, provocando um momento  $M_x$  de valor:  $M_x = F_z \times b$



**Figura 5.33 – Modelação da montagem do ensaio  $F_z, M_x$**

- **Medição  $F_z, M_y$**

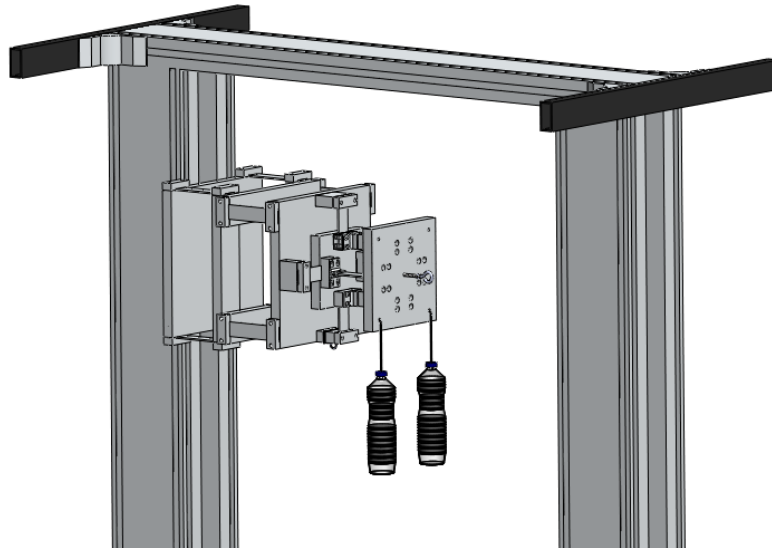
À semelhança do ensaio anterior o objectivo é caracterizar a interacção entre a componente z da força e o momento. Foi aplicada uma componente negativa da força (Figura 5.34), provocando um momento  $M_y$  de valor:  $M_y = F_z \times b$



**Figura 5.34 – Modelação da montagem do ensaio  $F_z, M_y$**

- **Medição  $F_x$ ,  $F_x$  e Medição  $F_x$ ,  $2F_x$**

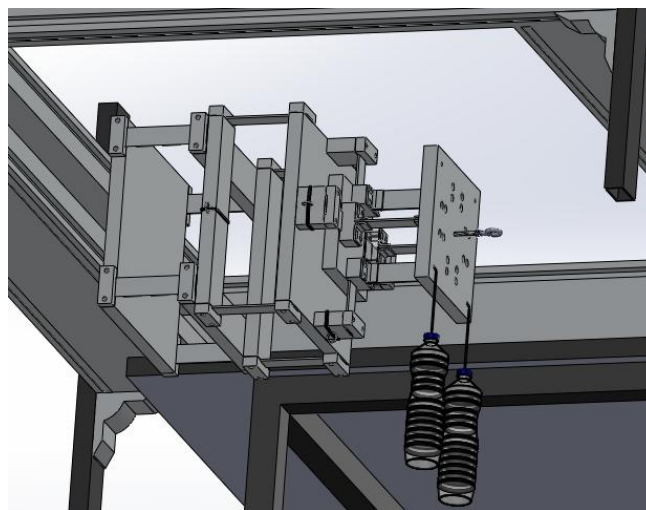
O objectivo deste ensaio é verificar a interacção entre  $F_x$  e  $M_z$ . Aplicaram-se duas forças  $F_x$  como demonstrado na Figura 5.35 num primeiro ensaio foi utilizado o mesmo carregamento em cada garrafa e verificou-se que as duas componentes da força cancelavam o momento de torção. Posteriormente duplicou-se o valor do carregamento numa das garrafas e detectou-se, tal como esperado, uma componente  $M_z$ .



**Figura 5.35 – Modelação da montagem do ensaio  $F_x$ ,  $F_x$**

- **Medição  $F_y$ ,  $F_y$  e Medição  $F_y$ ,  $2F_y$**

O ensaio da Figura 5.36 é em tudo semelhante ao anterior, verificando-se as interferências entre  $F_y$  e o momento de torção.



**Figura 5.36 – Modelação da montagem do ensaio  $F_y$ ,  $F_y$**

Tal como para os ensaios de força e momentos calculou-se o valor dos esforços experimentais. A título de exemplo representa-se na Tabela 5.19 e Tabela 5.20 os resultados obtidos para o ensaio  $F_x$ ,  $M_y$  para o método dos declives e dos mínimos quadrados respectivamente. Comparando os valores reais e experimentais é possível determinar o erro de medição.

**Tabela 5.19 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_x$ ,  $M_y$  (Método dos declives)**

	Medições F <sub>x</sub> , M <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N, N.m)			2º Ensaio (N, N.m)			3º Ensaio (N, N.m)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	14,96	14,85	0,11	24,83	24,65	0,18	34,69	34,43	0,26		
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,12	0	0,12	0,17	0	0,17		
SF <sub>z</sub>	0,58	0	0,58	-0,15	0	0,15	-0,04	0	0,04		
SM <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	0,41	0,46	0,05	0,68	0,76	0,08	1,01	1,07	0,06		
SM <sub>z</sub>	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,74	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,74	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,76
Erro M <sub>y</sub> (%):			10,84	Erro M <sub>y</sub> (%):			10,65	Erro M <sub>y</sub> (%):			5,47

**Tabela 5.20 – Resumo das extensões e erros do ensaio  $F_x$ ,  $M_y$  (Método dos mínimos quadrados)**

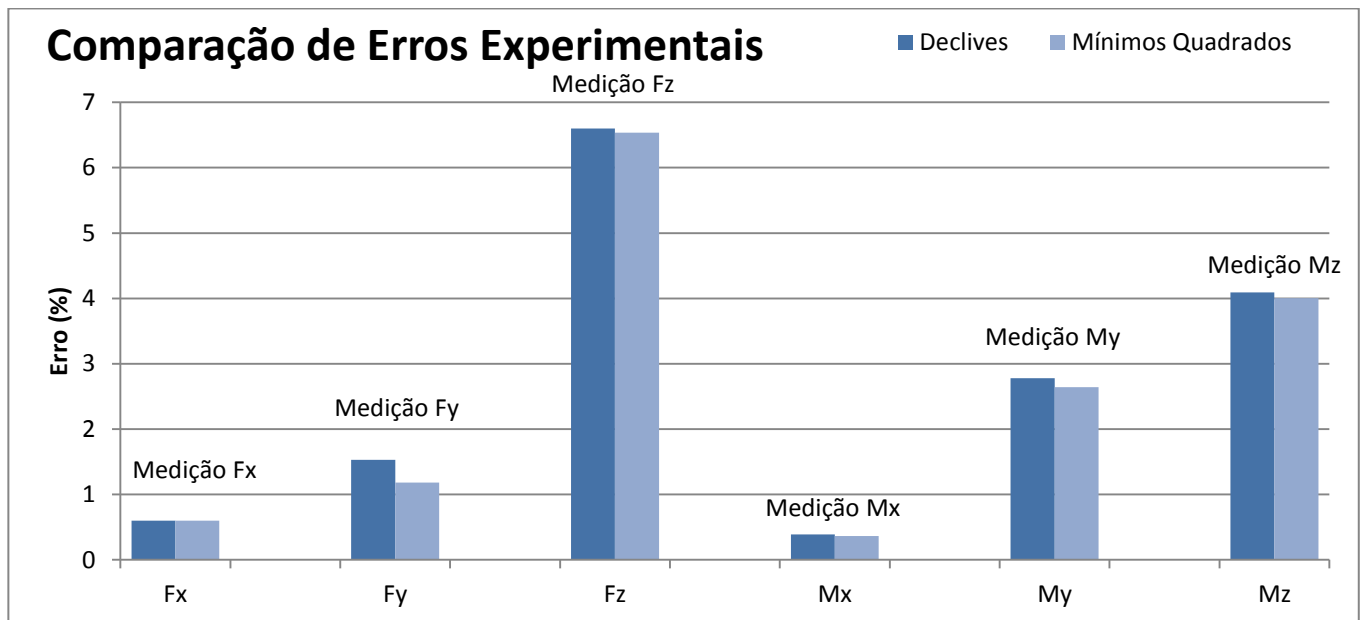
	Medições F <sub>x</sub> , M <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N, N.m)			2º Ensaio (N, N.m)			3º Ensaio (N, N.m)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	14,96	14,85	0,11	24,83	24,65	0,18	34,70	34,43	0,26		
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,12	0	0,12	0,17	0	0,17		
SF <sub>z</sub>	0,58	0	0,58	-0,15	0	0,15	-0,04	0	0,04		
SM <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	0,41	0,46	0,05	0,68	0,76	0,09	1,00	1,07	0,07		
SM <sub>z</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,74	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,74	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,76
Erro M <sub>y</sub> (%):			11,58	Erro M <sub>y</sub> (%):			11,40	Erro M <sub>y</sub> (%):			6,22

Comparando os erros obtidos nos dois métodos observa-se que para a componente x da força os erros são iguais. Na componente y do momento os erros foram inferiores ao utilizar o método dos declives.

Este procedimento foi repetido para as componentes  $F_x$  e  $F_y$ , as tabelas de resultados encontram-se no Anexo C

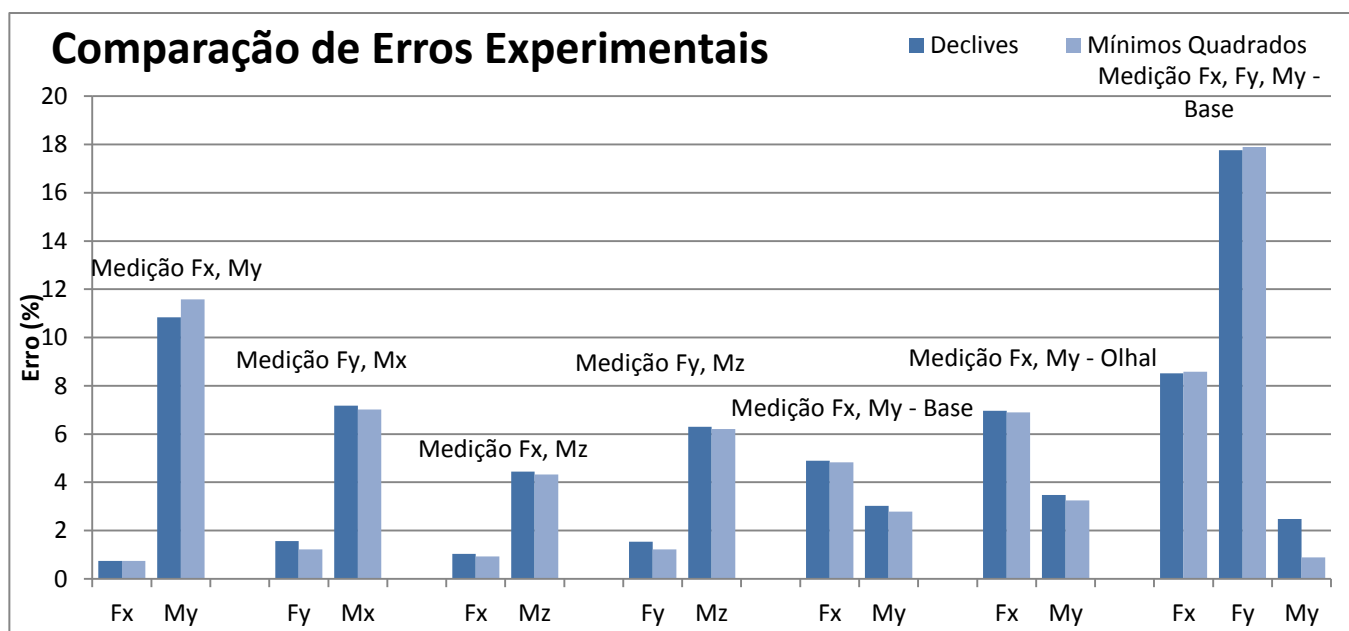
#### 5.8.4. Análise de erros

O gráfico da Figura 5.37 permite comparar os dois métodos de calibração e a diferença do valor dos erros nos ensaios experimentais de força e momentos.



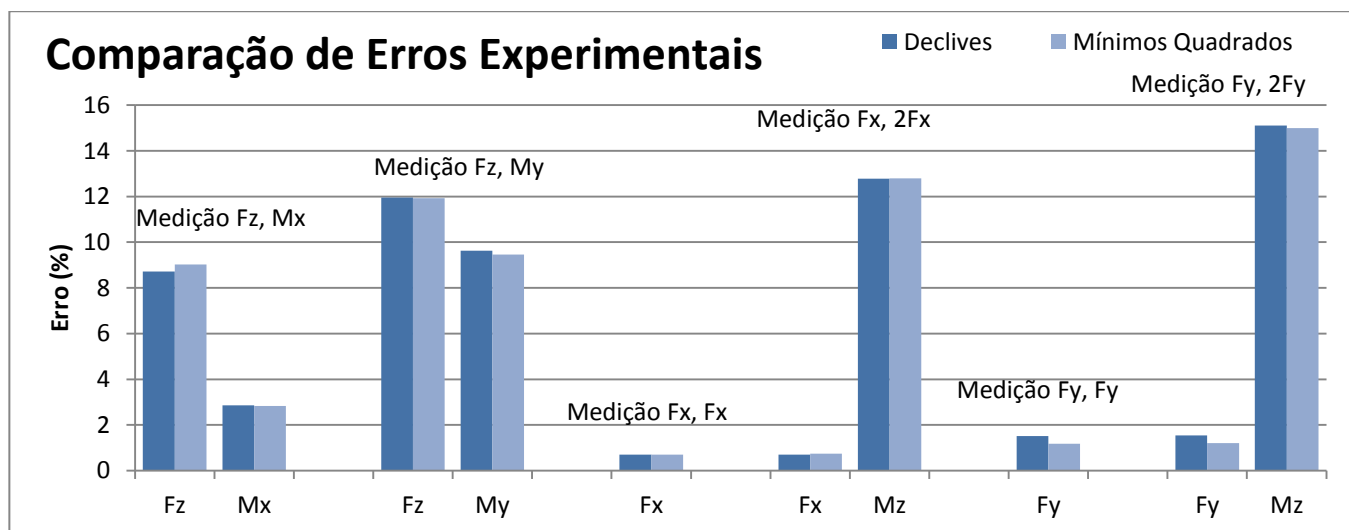
**Figura 5.37 – Gráfico comparativo dos erros para ensaios de forças e ensaios de momentos.**

Os erros obtidos são muito semelhantes entre os dois métodos de calibração utilizados, observa-se que o método dos mínimos quadrados apresenta erros ligeiramente inferiores. Todos os ensaios revelam erros inferiores a 7%. O maior erro é observado na componente z da força.



**Figura 5.38 - Gráfico comparativo dos erros para ensaios de forças e momentos combinados**

Na Figura 5.38 e Figura 5.39 observam-se os erros obtidos nos ensaios de teste de aplicação de esforços combinados. Alguns destes erros ultrapassam os 10%, nomeadamente os ensaios que envolvem forças desviadas, como por exemplo, o ensaio  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_y$  – Base, cujo erro é superior a todos os outros ensaios. Mais uma vez os valores dos erros são muito semelhantes entre os dois métodos de calibração.



**Figura 5.39 – Gráfico comparativo dos erros para ensaios de forças e momentos combinados**

Nos gráficos anteriores observam-se os valores dos erros do 1º Ensaio de todos os ensaios realizados. Na tabela da página seguinte representam-se os valores dos erros de todos os ensaios realizados para todas as medições efectuadas. Os valores a verde revelam o erro mínimo entre os dois métodos de calibração.

Forças		1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
		Declives	Mínimos	Declives	Mínimos	Declives	Mínimos
Fx	Erro Fx (%):	0,60	0,60	0,61	0,61	0,64	0,64
Fy	Erro Fy (%):	1,53	1,18	1,60	1,25	1,48	1,13
Fz	Erro Fz (%):	6,60	6,54	10,03	9,97	3,92	3,86

Momentos		1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
		Declives	Mínimos	Declives	Mínimos	Declives	Mínimos
Mx	Erro Mx (%):	0,39	0,36	0,42	0,44	0,73	0,76
My	Erro My (%):	2,78	2,64	0,31	0,17	0,18	0,05
Mz	Erro Mz (%):	4,09	4,00	2,28	2,37	4,80	4,88

Combinados		1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio	
		Declives	Mínimos	Declives	Mínimos	Declives	Mínimos
Fx, My	Erro Fx (%):	0,74	0,74	0,74	0,74	0,76	0,76
	Erro My (%):	10,84	11,58	10,65	11,40	5,47	6,22
Fy, Mx	Erro Fy (%):	1,56	1,22	1,55	1,20	1,59	1,24
	Erro Mx (%):	7,18	7,02	7,02	6,84	6,40	6,22
Fx, Mz	Erro Fx (%):	1,04	0,93	0,99	0,88	0,75	0,64
	Erro Mz (%):	4,44	4,32	4,16	4,04	3,81	3,69
Fy, Mz	Erro Fy (%):	1,54	1,22	1,57	1,24	1,52	1,20
	Erro Mz (%):	6,30	6,21	6,49	6,40	6,51	6,42
Fx, My - Base	Erro Fx (%):	4,90	4,83	5,37	5,31	5,93	5,88
	Erro My (%):	3,02	2,79	0,84	0,62	1,28	1,06
Fx, My - Olhal	Erro Fx (%):	7,14	7,14	8,86	8,86	7,73	7,73
	Erro My (%):	4,24	4,81	5,87	6,42	4,96	5,50
Fx, Fy, My – Base	Erro Fx (%):	8,51	8,58	5,16	5,23	5,38	5,44
	Erro Fy (%):	17,76	17,89	20,67	20,79	20,43	20,55
	Erro My (%):	2,48	0,89	3,04	1,50	2,91	1,37
Fz, Mx	Erro Fz (%):	8,72	9,02	8,53	8,83	8,97	9,27
	Erro Mx (%):	2,86	2,83	3,25	3,23	3,22	3,19
Fz, My	Erro Fz (%):	11,95	11,93	12,02	12,00	12,22	12,20
	Erro My (%):	9,63	9,46	10,35	10,17	10,12	9,95
Fx, Fx	Erro Fx (%):	0,70	0,70	0,71	0,71	0,79	0,79
Fx, 2Fx	Erro Fx (%):	0,71	0,75	0,63	0,67	0,67	0,70
	Erro Mz (%):	12,78	12,79	11,18	11,19	12,42	12,42
Fy, Fy	Erro Fy (%):	1,52	1,17	1,55	1,21	1,58	1,24
Fy, 2Fy	Erro Fy (%):	1,54	1,20	1,63	1,29	1,67	1,34
	Erro Mz (%):	15,10	15,00	12,72	12,62	15,25	15,15

## 6. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos efectuados para caracterizar o sensor dinamicamente. A importância desta caracterização é compreender o funcionamento do sensor em ensaios dinâmicos, nomeadamente determinar qual a sua gama de utilização, quais as suas frequências naturais e modos de vibração.

### 6.1. Modelo Teórico

Recorrendo ao *software Solidworks* realizou-se um ensaio de frequências de forma a determinar as primeiras frequências naturais e os modos de vibração correspondentes. Para isso definiram-se as condições de fronteira, encastrando a base do sensor, como se pode observar na Figura 6.1. Ao correr a simulação o programa automaticamente revela as 5 primeiras frequências naturais (Tabela 6.1) e correspondentes modos de vibração.

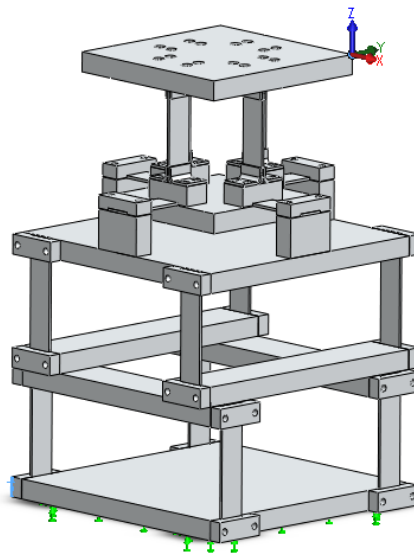


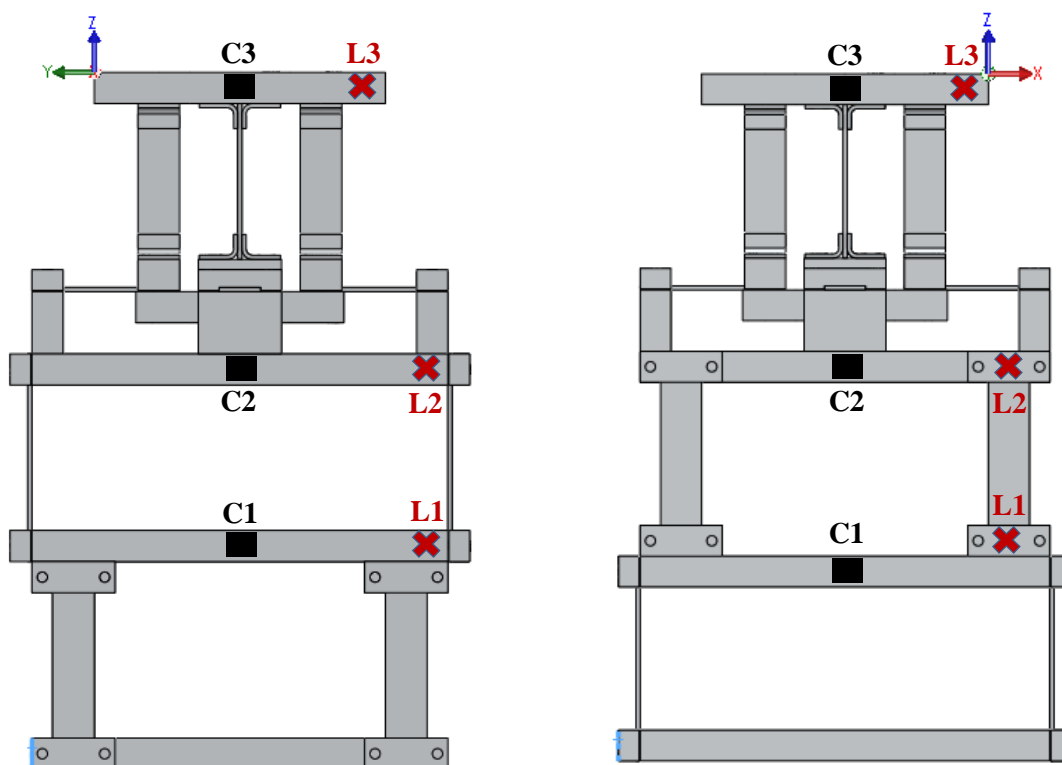
Figura 6.1 – Condições de Fronteira definidas no ensaio de frequências

Tabela 6.1 – Primeiras frequências naturais teóricas do sensor

Modo de vibração	1º	2º	3º	4º	5º
Frequência Natural (Hz)	27,977	33,099	84,417	97,587	102,54

## 6.2. Modelo Experimental

Com o intuito de confirmar os valores teóricos obtidos, realizaram-se algumas medições das frequências experimentalmente. Para isso realizaram-se as montagens representadas na Figura 6.2.



**Figura 6.2 – Esquema exemplificativo da disposição dos acelerómetros e pontos de aplicação das forças, à esquerda no plano XOZ, à direita no plano YOZ**

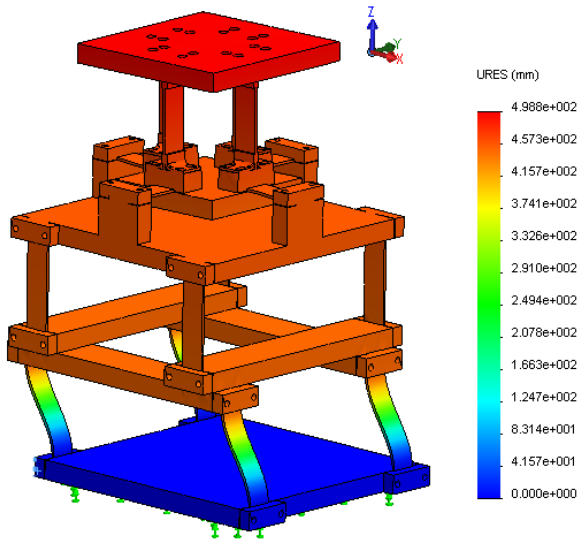
Onde cada quadrado preto representa um acelerómetro e cada cruz vermelha um ponto de aplicação da força. As forças foram sempre aplicadas no plano oposto ao dos acelerómetros. Para que fosse possível recolher informação sobre vários modos de vibração do sensor, realizaram-se vários ensaios, alterando em cada um o ponto de aplicação da força e ou a posição dos acelerómetros. Em cada ensaio experimental foram registadas as FRF's e também a sua parte imaginária de onde é possível retirar algum conhecimento das deslocações sofridas.

## 6.3. Análise Comparativa

Após obter os 5 primeiros modos de vibração do sensor através do modelo teórico, foi feito uma análise comparativa, com o intuito de comprovar esses modos pelo método experimental.



### 6.3.1. 1º Modo de Vibração



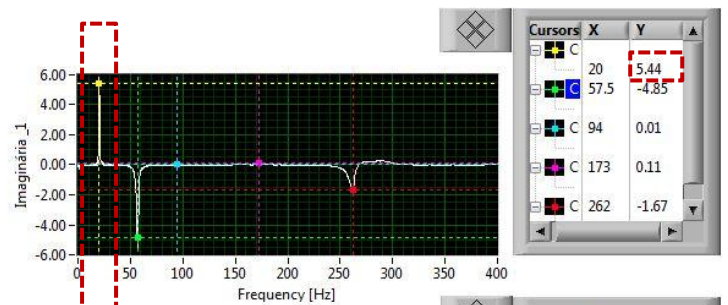
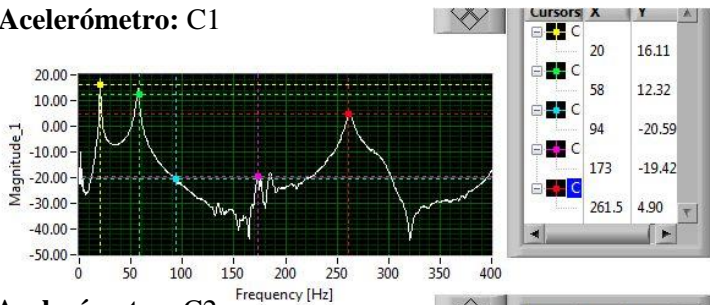
Frequência Natural Teórica: 27,8 Hz

#### Frequência Natural Experimental: 20 Hz

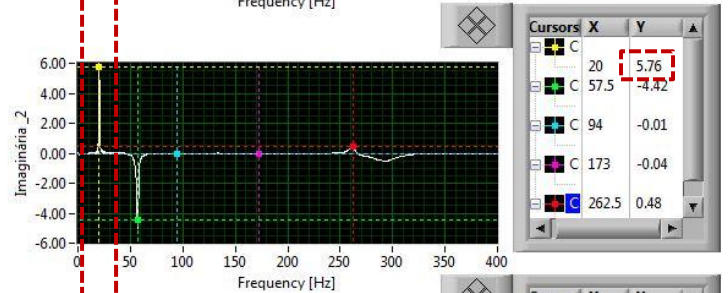
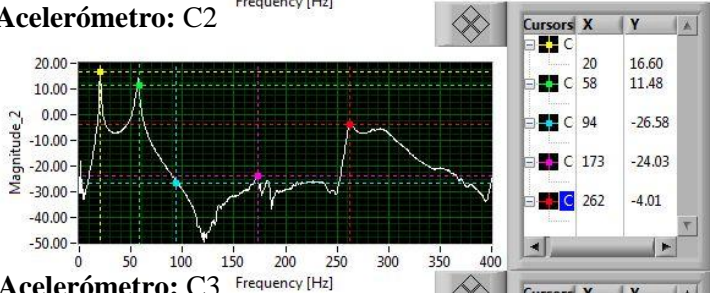
É possível observar no modelo teórico que o 1º e 2º andar movem-se em bloco, e o 3º desloca-se ligeiramente.

No ensaio experimental, representado de seguida graficamente, os acelerómetros encontram-se na posição C1, C2 e C3. A aplicação da força ocorreu em C3, este ensaio realizou-se no plano XOZ.

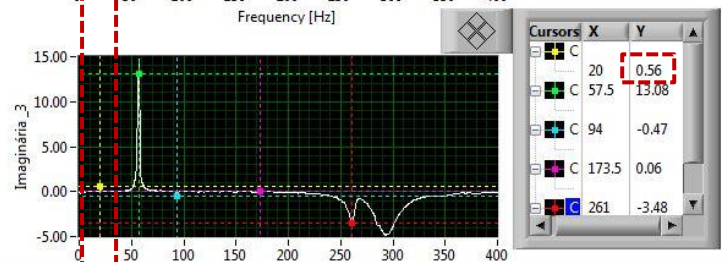
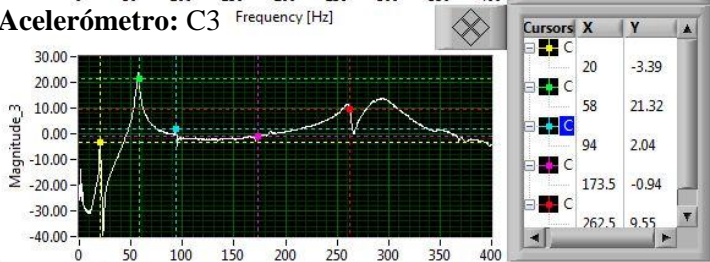
#### Acelerómetro: C1



#### Acelerómetro: C2

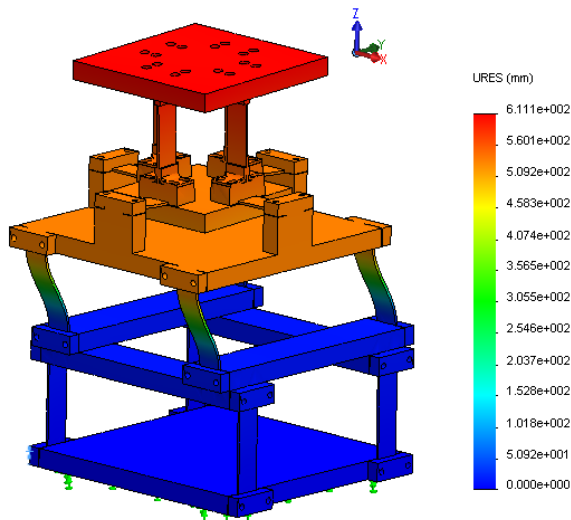


#### Acelerómetro: C3



É possível verificar que este é um modo de translação em X. Os valores experimentais dos deslocamentos não podem ser interpretados de forma quantitativa mas permitem fazer uma análise comparativa entre os vários andares do sensor. Comprova-se através dos valores experimentais a movimentação em bloco do 1º e 2º andar e o pequeno deslocamento do 3º andar.

### 6.3.2. 2º Modo de Vibração



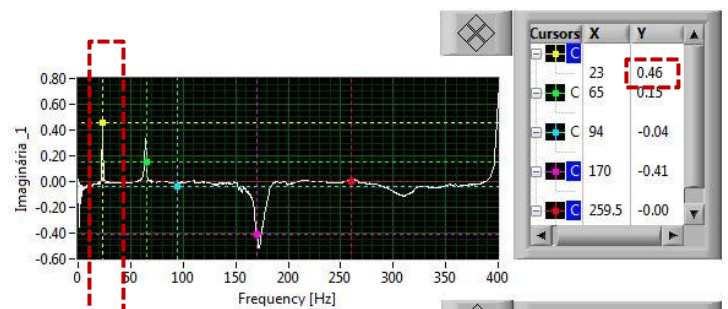
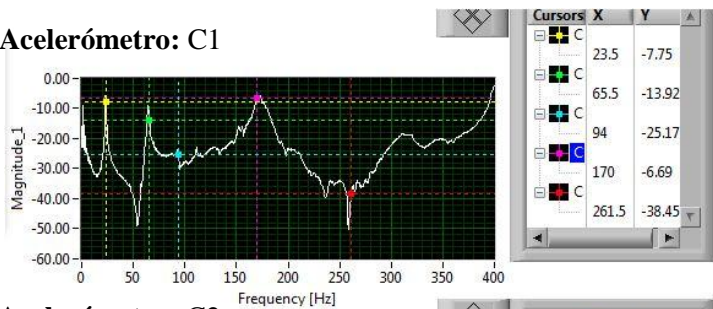
Frequência Natural Teórica: 33,1 Hz

### Frequência Natural Experimental: 23 Hz

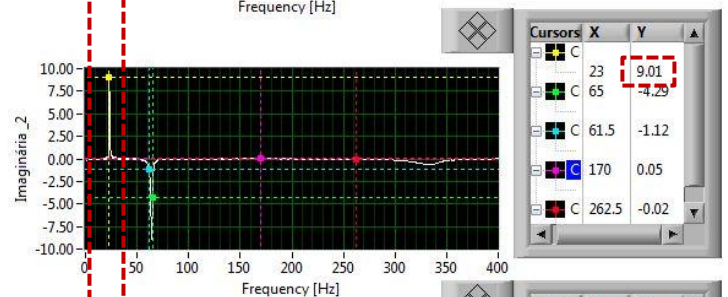
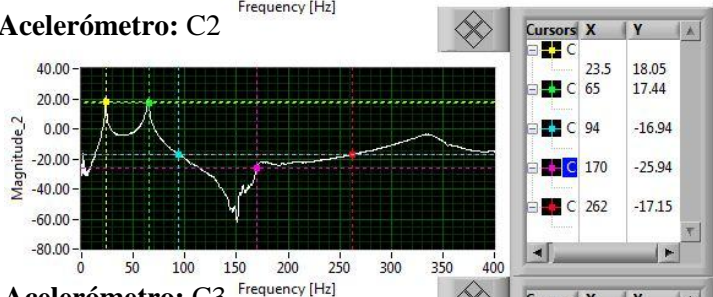
É possível observar no modelo teórico que o 1º e 3º andar apresentam um deslocamento reduzido, ao contrário do 2º andar.

No ensaio experimental, representado de seguida graficamente, os acelerómetros encontram-se na posição C1, C2 e C3. A aplicação da força ocorreu em C3, este ensaio realizou-se no plano YOZ.

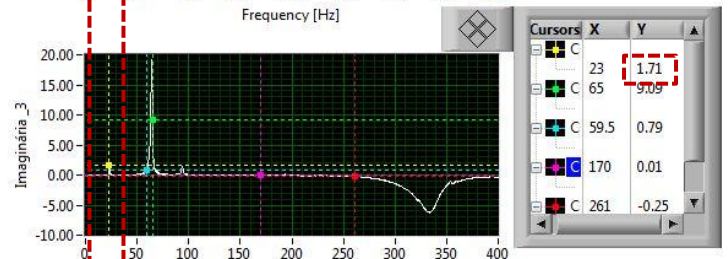
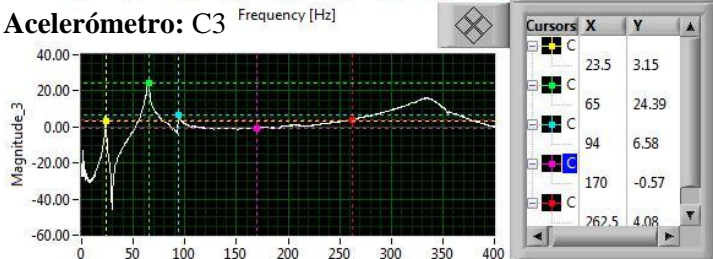
Acelerómetro: C1



Acelerómetro: C2



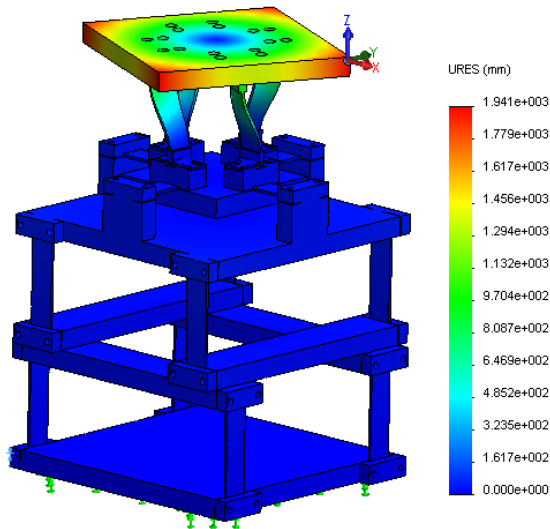
Acelerómetro: C3



É possível verificar que este é um modo de translação em Y. Os valores experimentais destacados comprovam os deslocamentos teóricos.



### 6.3.3. 3º Modo de Vibração



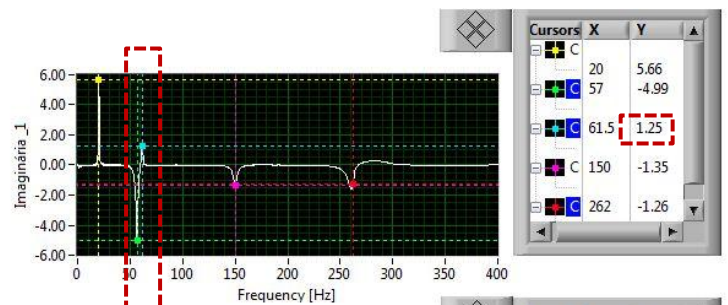
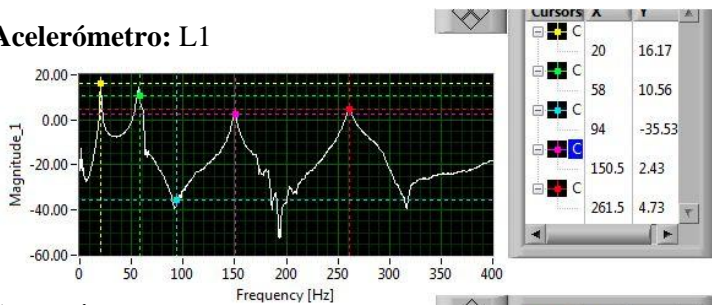
Frequência Natural Teórica: 84,4 Hz

**Frequência Natural Experimental: 61,5 Hz**

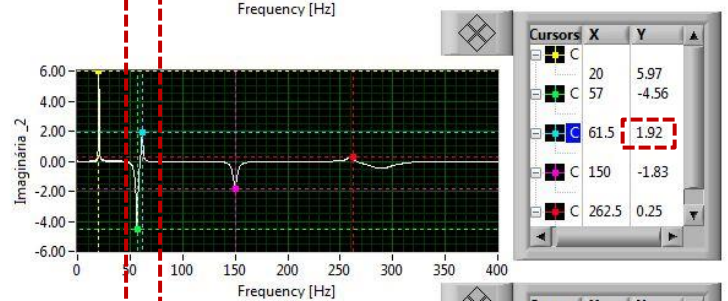
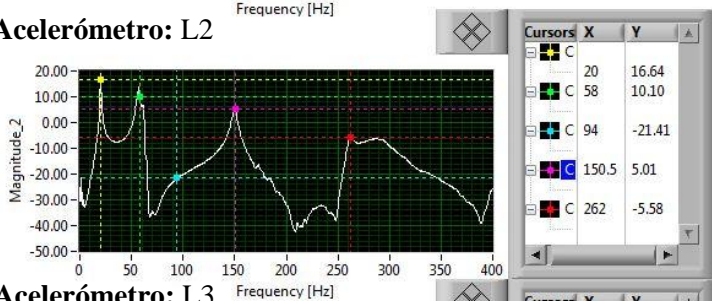
É possível observar no modelo teórico que o 1º e 2º andar não apresentam deslocamento, apenas o 3º andar mostra um comportamento de rotação.

Neste ensaio experimental, os acelerómetros encontram-se na posição L1, L2 e L3. A aplicação da força ocorreu em L3, este ensaio realizou-se no plano XOZ.

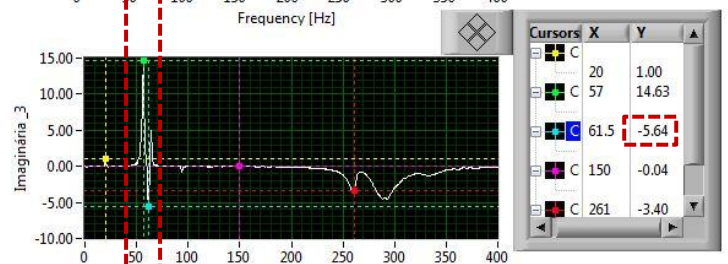
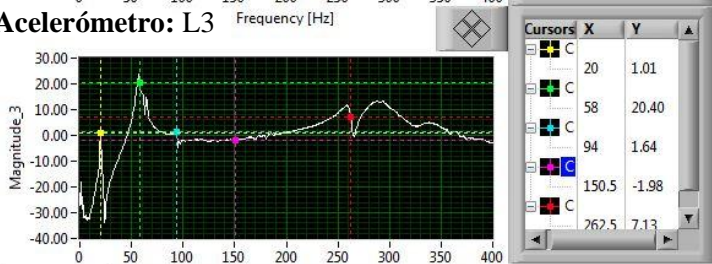
**Acelerómetro: L1**



**Acelerómetro: L2**

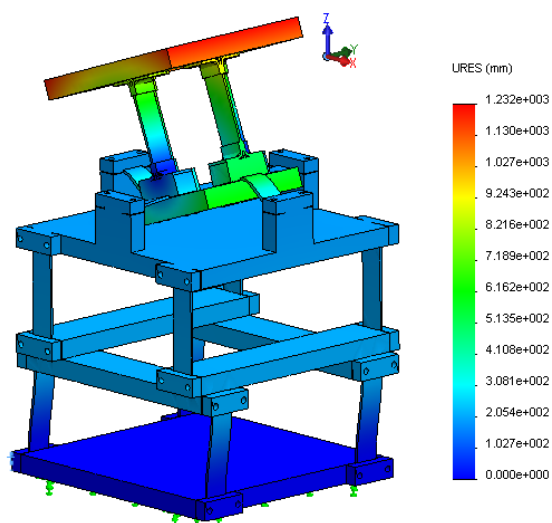


**Acelerómetro: L3**



É possível verificar que este é um modo de rotação segundo o eixo Z. Os valores experimentais destacados comprovam os pequenos deslocamentos no 1º e 2º andar do sensor comparativamente com os deslocamentos no 3º andar.

### 6.3.4. 4º Modo de Vibração



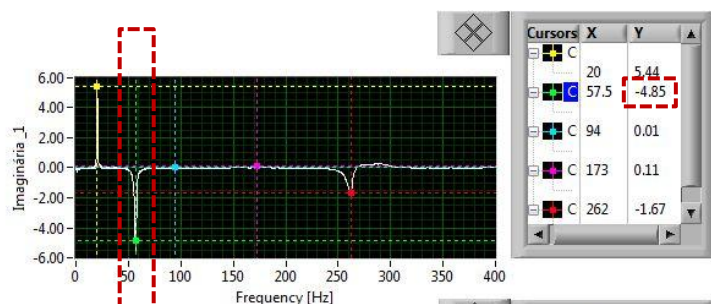
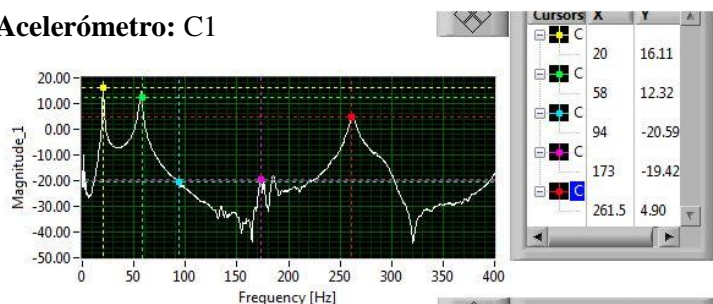
Frequência Natural Teórica: 97,6 Hz

**Frequência Natural Experimental: 57,5 Hz**

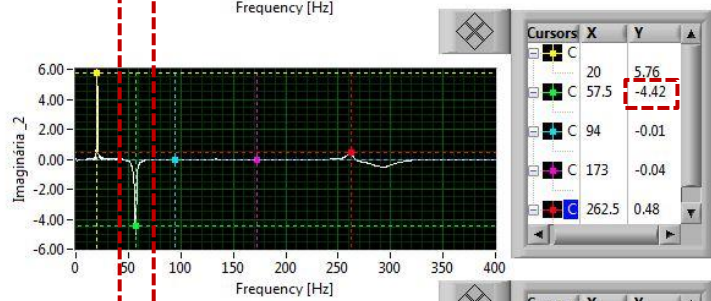
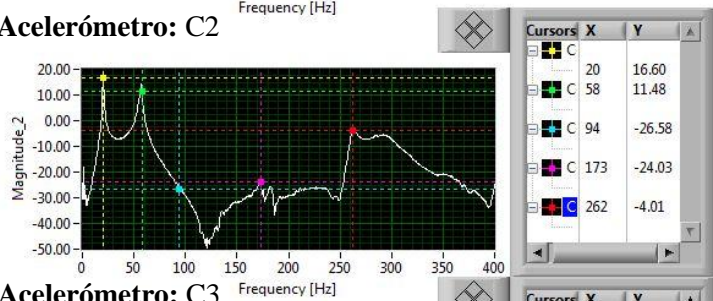
É possível observar no modelo teórico que o 1º e 2º andar movem-se numa direcção e o 3º andar apresenta um deslocamento bastante superior na direcção oposta.

No ensaio experimental, representado de seguida graficamente, os acelerómetros encontram-se na posição C1, C2 e C3. A aplicação da força ocorreu em C3, este ensaio realizou-se no plano XOZ.

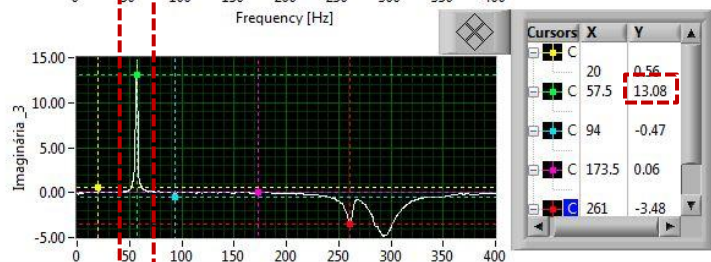
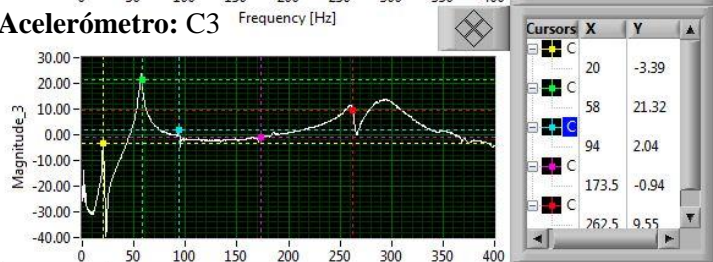
**Acelerómetro: C1**



**Acelerómetro: C2**



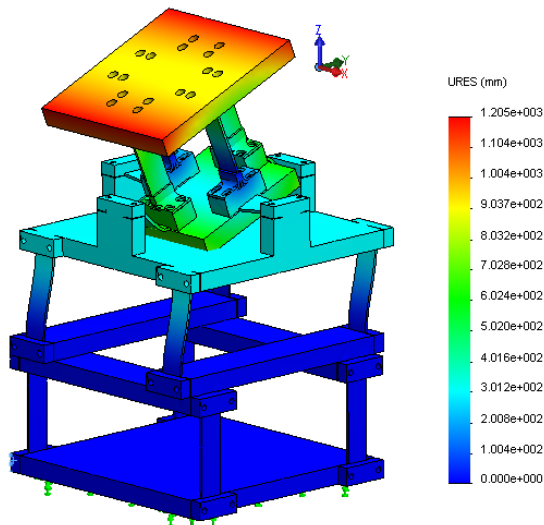
**Acelerómetro: C3**



Este é um modo de rotação em torno do eixo Y, os valores experimentais comprovam o deslocamento semelhante nos dois primeiros andares num sentido e o deslocamento bastante superior do 3º andar no sentido oposto.



### 6.3.5. 5º Modo de Vibração



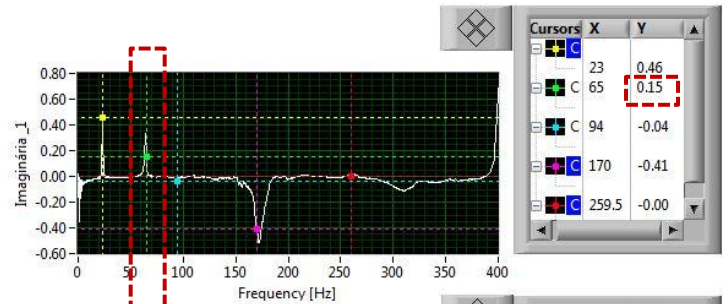
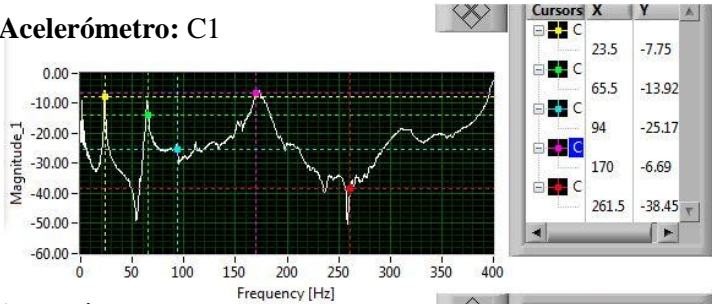
Frequência Natural Teórica: 102,5 Hz

**Frequência Natural Experimental: 65 Hz**

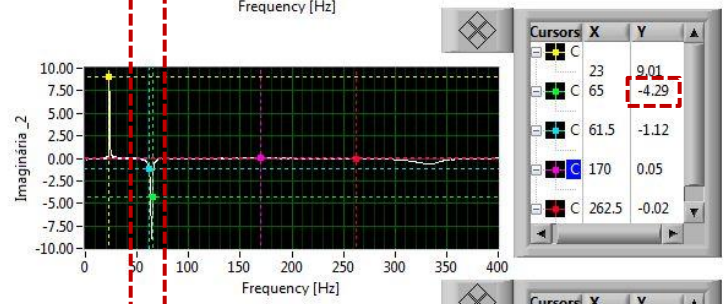
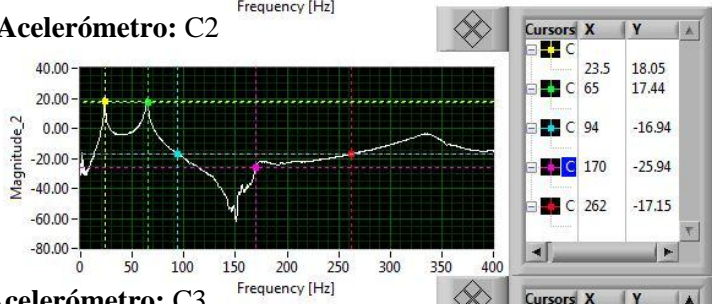
Neste modo de vibração o 1º andar não apresenta deslocamento significativo, o 2º andar move-se num sentido comum valor considerável de deslocamento e o 3º andar no sentido oposto com um valor bastante superior.

Neste ensaio experimental, os acelerómetros encontram-se na posição C1, C2 e C3. A aplicação da força ocorreu em C3, este ensaio realizou-se no plano YOZ.

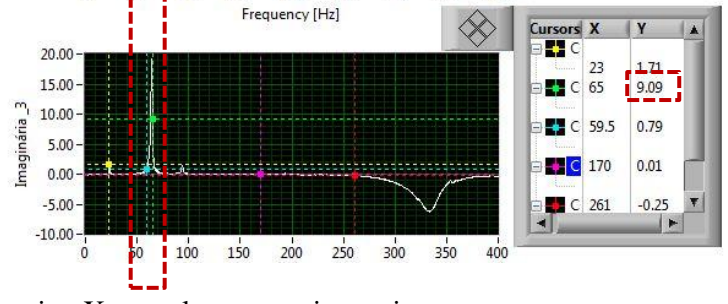
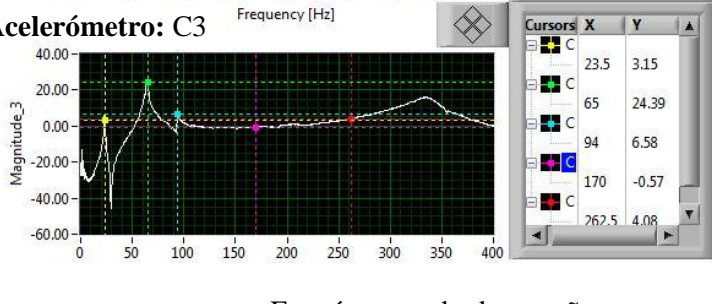
**Acelerómetro: C1**



**Acelerómetro: C2**



**Acelerómetro: C3**



Este é um modo de rotação em torno do eixo X, os valores experimentais comprovam o deslocamento quase nulo no 1º andar, moderado no 2º andar num sentido e os valores superiores de deslocamento do 3º andar no sentido oposto.



## 7. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho caracterizou-se um sensor de forças/momentos que mede seis componentes de um determinado carregamento (3 componentes ortogonais da força e 3 componentes ortogonais do momento), realçando as suas características e o processo de medição que utiliza. Fez-se uma avaliação inicial, a qual resultou em algumas alterações à configuração prévia do sensor, nomeadamente na disposição e ligações dos extensómetros.

Um estudo mais aprofundado do sensor foi feito utilizando uma modelação teórica do mesmo em *software Solidworks*. Na qual foi possível verificar o acoplamento de algumas componentes ( $F_x / M_y$  e  $F_y / M_x$ ). Estes acoplamentos traduzem-se em interferências nas medições das extensões presentes na tabela de interferências, representando cerca de 78 %. Surge assim a necessidade de proceder à calibração do sensor de forma a retirar das medições efectuadas o valor parasita das interferências.

Por forma a determinar uma matriz de calibração numérica utilizou-se o *Simulation Solidworks* para realizar simulações de ensaios onde se aplicaram vários esforços. Determinando as extensões sofridas em cada componente, para cada ensaio. Posteriormente calculou-se a matriz de calibração teórica, quer pelo método dos declives quer pelo método dos mínimos quadrados. As matrizes obtidas apresentam valores muito semelhantes. Para comprovar a eficácia das matrizes de calibração foram realizadas várias simulações de teste, onde se aplicaram diferentes esforços. Registadas as extensões e recorrendo à matriz de calibração, calcularam-se os esforços e determinaram-se os valores dos erros de medição para os dois métodos de calibração. Os valores dos erros não são significativos (inferior a 0,6 %) e são muito semelhantes para os dois métodos, podendo concluir-se que na realização de ensaios teóricos ambas as abordagens estudadas permitem obter bons resultados, no entanto o método dos mínimos quadrados é significativamente menos complexo do que o método dos declives. A utilização de um modelo numérico trouxe grandes benefícios a este estudo, não só a comprovar que os dois métodos de calibração podiam ser aplicadas na prática, como também para garantir que através dos dois é possível obter resultados semelhantes. A modelação do sensor permitiu retirar bastante informação em relação ao comportamento que devia ser esperado na aplicação experimental do sensor.

Foi realizada uma caracterização experimental do sensor, onde se calculou as matrizes de calibração estática do sensor, recorrendo ao método dos declives e dos mínimos quadrados. Utilizando o método dos declives constata-se mais uma vez o acoplamento das componentes  $F_x / M_y$  e  $F_y / M_x$  através dos gráficos da Figura 5.22.

Procedeu-se à validação das matrizes de calibração experimentais, realizando vários ensaios de teste, ensaios de aplicação de força, de momentos e de esforços combinados. Registrando os valores das extensões e aplicando as matrizes de calibração calcularam-se os valores experimentais dos esforços. Nos ensaios de aplicação de forças e momentos os erros obtidos são inferiores a 7 %, tendo em conta todos os factores de erro inerentes a um processo experimental, pode-se considerar este um valor aceitável, comprovando a eficácia das matrizes de calibração no cálculo dos esforços aplicados ao sensor. Alguns valores dos erros de medição nos ensaios de esforços combinados ultrapassam os 10 %, este facto pode ser explicado pelo aumento da complexidade em definir correctamente quais os esforços que na teoria estão aplicados, uma vez que muitas vezes são aplicadas forças com componentes em várias direcções. Uma vez mais é notório a semelhança dos valores dos erros entre os dois métodos de calibração, embora na maioria das medições o método dos mínimos quadrados apresenta valores de erro ligeiramente inferiores. Também na calibração experimental o método dos mínimos quadrados é significativamente menos complexo do que o método dos declives.

De modo a caracterizar dinamicamente o sensor, efectuaram-se ensaios de frequência recorrendo a um modelo teórico e também experimentalmente. A simulação teórica do ensaio de frequências revelou o valor das primeiras cinco frequências naturais do sensor e correspondentes modos de vibração, a primeira frequência natural teórica registada foi de 27,98 Hz. Comparando os resultados obtidos nos métodos teóricos e experimentais definiram-se os modos de vibração, os dois primeiros de translação e os três seguintes de rotação. A avaliação dinâmica deste sensor sugere uma reduzida gama de utilização, uma vez que o valor da primeira frequência natural é reduzido, tendo também em conta que na inclusão do modelo este valor diminui. Este sensor foi, no entanto construído de forma a facilitar o ajuste da sua gama de utilização dinâmica, bastando para isso diminuir o comprimento das vigas onde se encontram os extensómetros.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Futek - Advanced sensor technology. Inc.” [Online]. Disponível: <http://www.futek.com/apps.aspx>. [Consultado: 15-Jun-2012].
- [2] “A-Tech Instruments Ltd.” [Online]. Disponível: <http://www.a-tech.ca/series.php?id=68>. [Consultado: 26-Jun-2012].
- [3] “AMTI - Force and Motion.” [Online]. Disponível: <http://www.amti.biz/fss-overview.aspx>. [Consultado: 15-Jun-2012].
- [4] Y. Li, G. Wang, J. Zhang, e Z. Jia, “Dynamic characteristics of piezoelectric six-dimensional heavy force/moment sensor for large-load robotic manipulator,” *Measurement*, vol. 45, no. 5, pp. 1114–1125, Jun. 2012.
- [5] F. Beyeler, S. Muntwyler, e B. J. Nelson, “Design and Calibration of a Microfabricated 6-Axis Force-Torque Sensor for Microrobotic Applications,” em *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 520–525.
- [6] J. W. Joo, K. S. Na, and D. I. Kang, “Design and evaluation of a six-component load cell,” *Measurement*, vol. 32, pp. 125–133, 2002.
- [7] G.-S. Kim, “Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133, no. 1, pp. 27–34, Jan. 2007.
- [8] G. Mastinu, M. Gobbi, and G. Previati, “A New Six-axis Load Cell. Part I: Design,” *Experimental Mechanics*, vol. 51, no. 3, pp. 373–388, Maio 2011.
- [9] M. Gobbi, G. Previati, P. Guarneri, e G. Mastinu, “A New Six-Axis Load Cell. Part II: Error Analysis, Construction and Experimental Assessment of Performances,” *Experimental Mechanics*, vol. 51, no. 3, pp. 389–399, Maio 2011.
- [10] J. E. Sanders, R. a Miller, D. N. Berglund, e S. G. Zachariah, “A modular six-directional force sensor for prosthetic assessment: a technical note,” *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 34, no. 2, pp. 195–202, Abril 1997.
- [11] R. M. Voyles, B. J. Nelson, e K. K. Yu Sun, “Calibration of multi-axis MEMS force sensors using the shape from motion method,” em *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, Maio, pp. 269–274.
- [12] S. A. Liu e H. L. Tzo, “A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities,” *Sensors and Actuators*, vol. 100, no. 112, pp. 223–230, 2002.

- [13] J. Zhenlin, G. Feng, e Z. Xiaohui, “Design and analysis of a novel isotropic six-component force/torque sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 109, no. 1–2, pp. 17–20, Dezembro 2003.
- [14] L.-P. Chao e K.-T. Chen, “Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 63, no. 2, pp. 105–112, Out. 1997.
- [15] G. Kim, D.-I. Kang, e S.-H. Rhee, “Design and fabrication of a six-component forcermoment sensor,” *Sensors and Actuators*, vol. 77, pp. 209–220, 1999.
- [16] J.-J. Park e G.-S. Kim, “Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot’s gripper,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 118, no. 1, pp. 127–134, Jan. 2005.
- [17] A. Urgueira, “*Fundamentos de Extensometria Eléctrica*.”2006.
- [18] Micro-Measurements, “*General Purpose Strain Gages - Linear Pattern*.”Vishay micro-measurements.
- [19] Tech Note TN-505-4, “*Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendations*.”Vishay micro-measurements, 2007.
- [20] R. Cook, D. Malkus, e M. Plesha, “*Concepts and Applications of Finite Element Analysis*,” 3ª Edição 1989.
- [21] Bernardo J. A. M. (2011) “*Projecto e construção de um sensor destinado a medir forças/momentos em três direcções ortogonais*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

## **Anexos**

## Anexo A

### Extensões verificadas nos ensaios de calibração

- **Fx1**

	Ensaio F <sub>x1</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-3,62 X 10 <sup>-09</sup>	-1,72 X 10 <sup>-08</sup>	-4,07 X 10 <sup>-09</sup>	3,00 X 10 <sup>-09</sup>	-2,51 X 10 <sup>-08</sup>	-5,09 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	4,86 X 10 <sup>-05</sup>	-9,41 X 10 <sup>-08</sup>	5,69 X 10 <sup>-09</sup>	2,53 X 10 <sup>-08</sup>	6,30 X 10 <sup>-09</sup>	5,20 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 3	9,58 X 10 <sup>-05</sup>	-1,02 X 10 <sup>-07</sup>	-1,09 X 10 <sup>-08</sup>	9,45 X 10 <sup>-09</sup>	4,14 X 10 <sup>-08</sup>	1,11 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 4	1,43 X 10 <sup>-04</sup>	-1,52 X 10 <sup>-07</sup>	8,44 X 10 <sup>-09</sup>	-8,64 X 10 <sup>-09</sup>	6,82 X 10 <sup>-08</sup>	1,46 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 5	1,90 X 10 <sup>-04</sup>	-2,19 X 10 <sup>-07</sup>	1,68 X 10 <sup>-07</sup>	-2,16 X 10 <sup>-07</sup>	2,00 X 10 <sup>-08</sup>	-2,05 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 6	2,37 X 10 <sup>-04</sup>	-2,86 X 10 <sup>-07</sup>	-8,04 X 10 <sup>-08</sup>	6,38 X 10 <sup>-09</sup>	7,99 X 10 <sup>-08</sup>	-1,42 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 7	2,85 X 10 <sup>-04</sup>	-3,19 X 10 <sup>-07</sup>	-6,78 X 10 <sup>-08</sup>	2,03 X 10 <sup>-09</sup>	1,11 X 10 <sup>-07</sup>	5,10 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 8	3,32 X 10 <sup>-04</sup>	-4,01 X 10 <sup>-07</sup>	-1,06 X 10 <sup>-07</sup>	-5,28 X 10 <sup>-08</sup>	7,52 X 10 <sup>-08</sup>	2,89 X 10 <sup>-08</sup>

	Ensaio F <sub>x1</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	3,32 X 10 <sup>-04</sup>	-3,94 X 10 <sup>-07</sup>	-9,34 X 10 <sup>-08</sup>	-1,46 X 10 <sup>-08</sup>	8,71 X 10 <sup>-08</sup>	4,53 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	2,85 X 10 <sup>-04</sup>	-2,93 X 10 <sup>-07</sup>	-6,75 X 10 <sup>-08</sup>	-2,72 X 10 <sup>-08</sup>	9,61 X 10 <sup>-08</sup>	1,70 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 3	2,37 X 10 <sup>-04</sup>	-3,00 X 10 <sup>-07</sup>	-8,20 X 10 <sup>-08</sup>	-3,29 X 10 <sup>-08</sup>	3,56 X 10 <sup>-08</sup>	-3,27 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 4	1,90 X 10 <sup>-04</sup>	-2,54 X 10 <sup>-07</sup>	-5,77 X 10 <sup>-08</sup>	-1,75 X 10 <sup>-08</sup>	5,51 X 10 <sup>-08</sup>	-5,29 X 10 <sup>-10</sup>
Carga 5	1,43 X 10 <sup>-04</sup>	-1,77 X 10 <sup>-07</sup>	-4,07 X 10 <sup>-08</sup>	-7,83 X 10 <sup>-09</sup>	3,50 X 10 <sup>-08</sup>	-1,02 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 6	9,57 X 10 <sup>-05</sup>	-1,45 X 10 <sup>-07</sup>	-1,04 X 10 <sup>-08</sup>	1,34 X 10 <sup>-08</sup>	1,96 X 10 <sup>-08</sup>	9,00 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 7	4,86 X 10 <sup>-05</sup>	-6,97 X 10 <sup>-08</sup>	-2,94 X 10 <sup>-08</sup>	-2,82 X 10 <sup>-08</sup>	-4,94 X 10 <sup>-09</sup>	-8,03 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 8	-5,86 X 10 <sup>-08</sup>	1,05 X 10 <sup>-08</sup>	1,60 X 10 <sup>-08</sup>	6,90 X 10 <sup>-09</sup>	3,09 X 10 <sup>-09</sup>	6,90 X 10 <sup>-09</sup>

- **Fx2**

	Ensaio F <sub>x2</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-1,64 X 10 <sup>-08</sup>	-3,18 X 10 <sup>-08</sup>	-2,18 X 10 <sup>-09</sup>	-1,29 X 10 <sup>-08</sup>	-1,10 X 10 <sup>-09</sup>	-3,32 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 2	4,83 X 10 <sup>-05</sup>	-1,40 X 10 <sup>-07</sup>	2,20 X 10 <sup>-07</sup>	2,27 X 10 <sup>-07</sup>	-1,73 X 10 <sup>-08</sup>	7,07 X 10 <sup>-10</sup>
Carga 3	9,52 X 10 <sup>-05</sup>	-2,42 X 10 <sup>-07</sup>	-6,51 X 10 <sup>-08</sup>	2,71 X 10 <sup>-07</sup>	-1,71 X 10 <sup>-07</sup>	2,01 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 4	1,42 X 10 <sup>-04</sup>	-3,66 X 10 <sup>-07</sup>	-9,89 X 10 <sup>-08</sup>	3,52 X 10 <sup>-07</sup>	-3,29 X 10 <sup>-07</sup>	-9,69 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 5	1,89 X 10 <sup>-04</sup>	-5,05 X 10 <sup>-07</sup>	-1,65 X 10 <sup>-07</sup>	4,70 X 10 <sup>-07</sup>	-4,77 X 10 <sup>-07</sup>	2,40 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 6	2,36 X 10 <sup>-04</sup>	-6,11 X 10 <sup>-07</sup>	-2,24 X 10 <sup>-07</sup>	5,78 X 10 <sup>-07</sup>	-6,71 X 10 <sup>-07</sup>	-1,43 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 7	2,83 X 10 <sup>-04</sup>	-7,40 X 10 <sup>-07</sup>	-2,36 X 10 <sup>-07</sup>	6,81 X 10 <sup>-07</sup>	-7,55 X 10 <sup>-07</sup>	3,34 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 8	3,30 X 10 <sup>-04</sup>	-7,77 X 10 <sup>-07</sup>	-2,62 X 10 <sup>-07</sup>	8,23 X 10 <sup>-07</sup>	-8,12 X 10 <sup>-07</sup>	2,32 X 10 <sup>-08</sup>

	Ensaio F <sub>x2</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	3,30 X 10 <sup>-04</sup>	-8,11 X 10 <sup>-07</sup>	-2,48 X 10 <sup>-07</sup>	8,16 X 10 <sup>-07</sup>	-7,97 X 10 <sup>-07</sup>	-3,42 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	2,83 X 10 <sup>-04</sup>	-6,82 X 10 <sup>-07</sup>	-1,95 X 10 <sup>-07</sup>	7,02 X 10 <sup>-07</sup>	-6,48 X 10 <sup>-07</sup>	-2,22 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 3	2,36 X 10 <sup>-04</sup>	-6,09 X 10 <sup>-07</sup>	-2,35 X 10 <sup>-07</sup>	5,94 X 10 <sup>-07</sup>	-6,19 X 10 <sup>-07</sup>	-1,26 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 4	1,89 X 10 <sup>-04</sup>	-4,64 X 10 <sup>-07</sup>	-1,59 X 10 <sup>-07</sup>	4,85 X 10 <sup>-07</sup>	-4,84 X 10 <sup>-07</sup>	2,93 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 5	1,42 X 10 <sup>-04</sup>	-3,59 X 10 <sup>-07</sup>	-8,71 X 10 <sup>-08</sup>	3,85 X 10 <sup>-07</sup>	-3,09 X 10 <sup>-07</sup>	1,28 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 6	9,51 X 10 <sup>-05</sup>	-2,60 X 10 <sup>-07</sup>	-4,73 X 10 <sup>-08</sup>	2,66 X 10 <sup>-07</sup>	-1,72 X 10 <sup>-07</sup>	4,24 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 7	4,82 X 10 <sup>-05</sup>	-1,28 X 10 <sup>-07</sup>	-3,32 X 10 <sup>-09</sup>	9,66 X 10 <sup>-08</sup>	-4,52 X 10 <sup>-08</sup>	1,59 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 8	-2,90 X 10 <sup>-08</sup>	-8,88 X 10 <sup>-09</sup>	-1,38 X 10 <sup>-08</sup>	2,00 X 10 <sup>-08</sup>	8,80 X 10 <sup>-09</sup>	1,23 X 10 <sup>-08</sup>

• Fx3

	Ensaio F <sub>x3</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	3,02 X 10 <sup>-08</sup>	-1,66 X 10 <sup>-08</sup>	-7,05 X 10 <sup>-09</sup>	1,35 X 10 <sup>-08</sup>	-2,20 X 10 <sup>-08</sup>	-2,44 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 2	4,78 X 10 <sup>-05</sup>	4,20 X 10 <sup>-07</sup>	-8,86 X 10 <sup>-07</sup>	1,16 X 10 <sup>-07</sup>	5,59 X 10 <sup>-05</sup>	8,02 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	9,42 X 10 <sup>-05</sup>	9,25 X 10 <sup>-07</sup>	-1,64 X 10 <sup>-06</sup>	3,33 X 10 <sup>-07</sup>	1,10 X 10 <sup>-04</sup>	1,62 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 4	1,41 X 10 <sup>-04</sup>	1,31 X 10 <sup>-06</sup>	-2,46 X 10 <sup>-06</sup>	4,12 X 10 <sup>-07</sup>	1,65 X 10 <sup>-04</sup>	2,08 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 5	1,87 X 10 <sup>-04</sup>	1,75 X 10 <sup>-06</sup>	-3,20 X 10 <sup>-06</sup>	4,61 X 10 <sup>-07</sup>	2,19 X 10 <sup>-04</sup>	2,36 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 6	2,33 X 10 <sup>-04</sup>	2,16 X 10 <sup>-06</sup>	-4,03 X 10 <sup>-06</sup>	5,96 X 10 <sup>-07</sup>	2,74 X 10 <sup>-04</sup>	2,29 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 7	2,80 X 10 <sup>-04</sup>	2,60 X 10 <sup>-06</sup>	-4,80 X 10 <sup>-06</sup>	6,64 X 10 <sup>-07</sup>	3,28 X 10 <sup>-04</sup>	3,18 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 8	3,26 X 10 <sup>-04</sup>	3,07 X 10 <sup>-06</sup>	-5,65 X 10 <sup>-06</sup>	7,61 X 10 <sup>-07</sup>	3,83 X 10 <sup>-04</sup>	2,90 X 10 <sup>-06</sup>

	Ensaio F <sub>x3</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	3,26 X 10 <sup>-04</sup>	3,02 X 10 <sup>-06</sup>	-5,64 X 10 <sup>-06</sup>	7,59 X 10 <sup>-07</sup>	3,83 X 10 <sup>-04</sup>	3,25 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 2	2,80 X 10 <sup>-04</sup>	2,61 X 10 <sup>-06</sup>	-4,77 X 10 <sup>-06</sup>	6,74 X 10 <sup>-07</sup>	3,28 X 10 <sup>-04</sup>	3,33 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 3	2,33 X 10 <sup>-04</sup>	2,15 X 10 <sup>-06</sup>	-3,97 X 10 <sup>-06</sup>	5,51 X 10 <sup>-07</sup>	2,74 X 10 <sup>-04</sup>	2,97 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 4	1,87 X 10 <sup>-04</sup>	1,75 X 10 <sup>-06</sup>	-3,17 X 10 <sup>-06</sup>	4,89 X 10 <sup>-07</sup>	2,19 X 10 <sup>-04</sup>	2,69 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 5	1,40 X 10 <sup>-04</sup>	1,33 X 10 <sup>-06</sup>	-2,34 X 10 <sup>-06</sup>	3,80 X 10 <sup>-07</sup>	1,65 X 10 <sup>-04</sup>	2,28 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 6	9,40 X 10 <sup>-05</sup>	8,53 X 10 <sup>-07</sup>	-1,59 X 10 <sup>-06</sup>	2,50 X 10 <sup>-07</sup>	1,10 X 10 <sup>-04</sup>	1,48 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 7	4,77 X 10 <sup>-05</sup>	4,69 X 10 <sup>-07</sup>	-8,30 X 10 <sup>-07</sup>	1,87 X 10 <sup>-07</sup>	5,58 X 10 <sup>-05</sup>	8,10 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	-3,31 X 10 <sup>-08</sup>	1,65 X 10 <sup>-08</sup>	-1,03 X 10 <sup>-08</sup>	-1,02 X 10 <sup>-08</sup>	-2,85 X 10 <sup>-08</sup>	-3,19 X 10 <sup>-08</sup>

- Fy1

	Ensaio F <sub>y1</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	2,09 X 10 <sup>-08</sup>	8,02 X 10 <sup>-09</sup>	1,06 X 10 <sup>-08</sup>	3,08 X 10 <sup>-08</sup>	8,24 X 10 <sup>-08</sup>	4,02 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 2	4,30 X 10 <sup>-07</sup>	4,90 X 10 <sup>-05</sup>	1,92 X 10 <sup>-08</sup>	6,99 X 10 <sup>-07</sup>	-1,34 X 10 <sup>-07</sup>	5,75 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 3	8,32 X 10 <sup>-07</sup>	9,67 X 10 <sup>-05</sup>	5,09 X 10 <sup>-07</sup>	2,52 X 10 <sup>-06</sup>	-2,82 X 10 <sup>-07</sup>	1,44 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	1,16 X 10 <sup>-06</sup>	1,44 X 10 <sup>-04</sup>	4,86 X 10 <sup>-07</sup>	3,10 X 10 <sup>-06</sup>	-3,79 X 10 <sup>-07</sup>	7,14 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 5	1,48 X 10 <sup>-06</sup>	1,92 X 10 <sup>-04</sup>	6,12 X 10 <sup>-07</sup>	3,66 X 10 <sup>-06</sup>	-4,25 X 10 <sup>-07</sup>	1,23 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	1,81 X 10 <sup>-06</sup>	2,40 X 10 <sup>-04</sup>	6,88 X 10 <sup>-07</sup>	4,53 X 10 <sup>-06</sup>	-5,73 X 10 <sup>-07</sup>	1,12 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	2,27 X 10 <sup>-06</sup>	2,88 X 10 <sup>-04</sup>	1,06 X 10 <sup>-06</sup>	5,51 X 10 <sup>-06</sup>	-6,31 X 10 <sup>-07</sup>	9,53 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 8	2,53 X 10 <sup>-06</sup>	3,36 X 10 <sup>-04</sup>	1,11 X 10 <sup>-06</sup>	5,72 X 10 <sup>-06</sup>	-6,21 X 10 <sup>-07</sup>	9,23 X 10 <sup>-08</sup>

	Ensaio F <sub>y1</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	3,10 X 10 <sup>-06</sup>	3,36 X 10 <sup>-04</sup>	2,28 X 10 <sup>-06</sup>	7,86 X 10 <sup>-06</sup>	3,08 X 10 <sup>-07</sup>	1,36 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 2	2,35 X 10 <sup>-06</sup>	2,89 X 10 <sup>-04</sup>	1,72 X 10 <sup>-06</sup>	6,66 X 10 <sup>-06</sup>	-1,77 X 10 <sup>-07</sup>	6,14 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	2,42 X 10 <sup>-06</sup>	2,41 X 10 <sup>-04</sup>	1,85 X 10 <sup>-06</sup>	6,06 X 10 <sup>-06</sup>	5,32 X 10 <sup>-07</sup>	1,26 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 4	1,63 X 10 <sup>-06</sup>	1,93 X 10 <sup>-04</sup>	5,57 X 10 <sup>-07</sup>	3,17 X 10 <sup>-06</sup>	-2,41 X 10 <sup>-07</sup>	2,11 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	1,17 X 10 <sup>-06</sup>	1,45 X 10 <sup>-04</sup>	5,09 X 10 <sup>-07</sup>	2,79 X 10 <sup>-06</sup>	-1,22 X 10 <sup>-07</sup>	2,92 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	9,27 X 10 <sup>-07</sup>	9,72 X 10 <sup>-05</sup>	4,20 X 10 <sup>-07</sup>	1,74 X 10 <sup>-06</sup>	1,61 X 10 <sup>-07</sup>	3,95 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	5,79 X 10 <sup>-07</sup>	4,94 X 10 <sup>-05</sup>	2,76 X 10 <sup>-07</sup>	7,76 X 10 <sup>-07</sup>	2,78 X 10 <sup>-07</sup>	3,48 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	5,92 X 10 <sup>-08</sup>	-1,57 X 10 <sup>-08</sup>	-9,36 X 10 <sup>-09</sup>	-4,68 X 10 <sup>-09</sup>	6,18 X 10 <sup>-09</sup>	1,46 X 10 <sup>-08</sup>

- Fy2

	Ensaio F <sub>y2</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-1,07 X 10 <sup>-08</sup>	1,31 X 10 <sup>-08</sup>	-1,45 X 10 <sup>-08</sup>	-1,42 X 10 <sup>-09</sup>	-6,18 X 10 <sup>-09</sup>	3,28 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	6,45 X 10 <sup>-07</sup>	4,95 X 10 <sup>-05</sup>	-1,11 X 10 <sup>-06</sup>	-5,62 X 10 <sup>-05</sup>	4,09 X 10 <sup>-07</sup>	-8,63 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	1,40 X 10 <sup>-06</sup>	9,75 X 10 <sup>-05</sup>	-2,19 X 10 <sup>-06</sup>	-1,11 X 10 <sup>-04</sup>	7,93 X 10 <sup>-07</sup>	-1,23 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 4	2,07 X 10 <sup>-06</sup>	1,46 X 10 <sup>-04</sup>	-2,87 X 10 <sup>-06</sup>	-1,65 X 10 <sup>-04</sup>	1,14 X 10 <sup>-06</sup>	-2,02 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 5	2,07 X 10 <sup>-06</sup>	1,46 X 10 <sup>-04</sup>	-2,87 X 10 <sup>-06</sup>	-1,65 X 10 <sup>-04</sup>	1,14 X 10 <sup>-06</sup>	-2,02 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 6	3,48 X 10 <sup>-06</sup>	2,42 X 10 <sup>-04</sup>	-4,52 X 10 <sup>-06</sup>	-2,75 X 10 <sup>-04</sup>	1,90 X 10 <sup>-06</sup>	-2,98 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 7	4,14 X 10 <sup>-06</sup>	2,90 X 10 <sup>-04</sup>	-5,24 X 10 <sup>-06</sup>	-3,30 X 10 <sup>-04</sup>	2,27 X 10 <sup>-06</sup>	-3,73 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 8	4,90 X 10 <sup>-06</sup>	3,38 X 10 <sup>-04</sup>	-6,07 X 10 <sup>-06</sup>	-3,84 X 10 <sup>-04</sup>	2,53 X 10 <sup>-06</sup>	-3,58 X 10 <sup>-06</sup>

	Ensaio F <sub>y2</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	4,77 X 10 <sup>-06</sup>	3,38 X 10 <sup>-04</sup>	-5,96 X 10 <sup>-06</sup>	-3,84 X 10 <sup>-04</sup>	2,73 X 10 <sup>-06</sup>	-2,12 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 2	4,55 X 10 <sup>-06</sup>	2,90 X 10 <sup>-04</sup>	-5,10 X 10 <sup>-06</sup>	-3,30 X 10 <sup>-04</sup>	2,23 X 10 <sup>-06</sup>	-2,01 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 3	3,25 X 10 <sup>-06</sup>	2,42 X 10 <sup>-04</sup>	-5,18 X 10 <sup>-06</sup>	-2,75 X 10 <sup>-04</sup>	1,73 X 10 <sup>-06</sup>	-2,56 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 4	2,73 X 10 <sup>-06</sup>	1,94 X 10 <sup>-04</sup>	-3,68 X 10 <sup>-06</sup>	-2,20 X 10 <sup>-04</sup>	1,46 X 10 <sup>-06</sup>	-1,73 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 5	2,13 X 10 <sup>-06</sup>	1,46 X 10 <sup>-04</sup>	-2,80 X 10 <sup>-06</sup>	-1,65 X 10 <sup>-04</sup>	1,12 X 10 <sup>-06</sup>	-1,15 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 6	1,40 X 10 <sup>-06</sup>	9,75 X 10 <sup>-05</sup>	-1,91 X 10 <sup>-06</sup>	-1,11 X 10 <sup>-04</sup>	7,39 X 10 <sup>-07</sup>	-1,48 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 7	6,85 X 10 <sup>-07</sup>	4,94 X 10 <sup>-05</sup>	-1,02 X 10 <sup>-06</sup>	-5,61 X 10 <sup>-05</sup>	3,95 X 10 <sup>-07</sup>	-7,85 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	-2,84 X 10 <sup>-08</sup>	-1,44 X 10 <sup>-08</sup>	-1,62 X 10 <sup>-08</sup>	2,35 X 10 <sup>-08</sup>	-4,46 X 10 <sup>-08</sup>	-2,49 X 10 <sup>-08</sup>

• Fz

	Ensaio F <sub>z</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-2,80 X 10 <sup>-08</sup>	1,67 X 10 <sup>-08</sup>	-1,74 X 10 <sup>-08</sup>	-2,21 X 10 <sup>-08</sup>	1,18 X 10 <sup>-08</sup>	2,74 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	2,71 X 10 <sup>-07</sup>	-4,89 X 10 <sup>-08</sup>	2,11 X 10 <sup>-05</sup>	-1,09 X 10 <sup>-07</sup>	-1,11 X 10 <sup>-06</sup>	-2,79 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 3	6,52 X 10 <sup>-07</sup>	-1,17 X 10 <sup>-07</sup>	4,18 X 10 <sup>-05</sup>	6,58 X 10 <sup>-08</sup>	-2,21 X 10 <sup>-06</sup>	-1,20 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	9,26 X 10 <sup>-07</sup>	-1,78 X 10 <sup>-07</sup>	6,35 X 10 <sup>-05</sup>	2,39 X 10 <sup>-07</sup>	-3,27 X 10 <sup>-06</sup>	-1,90 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	1,29 X 10 <sup>-06</sup>	-1,97 X 10 <sup>-07</sup>	8,55 X 10 <sup>-05</sup>	-2,59 X 10 <sup>-06</sup>	-4,38 X 10 <sup>-06</sup>	-2,45 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	1,58 X 10 <sup>-06</sup>	-2,43 X 10 <sup>-07</sup>	1,06 X 10 <sup>-04</sup>	-3,58 X 10 <sup>-06</sup>	-5,44 X 10 <sup>-06</sup>	-3,22 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	1,85 X 10 <sup>-06</sup>	-3,41 X 10 <sup>-07</sup>	1,29 X 10 <sup>-04</sup>	-6,75 X 10 <sup>-06</sup>	-6,63 X 10 <sup>-06</sup>	-3,86 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	2,17 X 10 <sup>-06</sup>	-3,68 X 10 <sup>-07</sup>	1,51 X 10 <sup>-04</sup>	-6,09 X 10 <sup>-06</sup>	-6,13 X 10 <sup>-06</sup>	-4,87 X 10 <sup>-07</sup>

	Ensaio F <sub>z</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	2,20 X 10 <sup>-06</sup>	-3,01 X 10 <sup>-07</sup>	1,54 X 10 <sup>-04</sup>	-1,01 X 10 <sup>-05</sup>	-5,67 X 10 <sup>-06</sup>	-5,12 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 2	1,87 X 10 <sup>-06</sup>	-2,77 X 10 <sup>-07</sup>	1,30 X 10 <sup>-04</sup>	-5,59 X 10 <sup>-06</sup>	-4,95 X 10 <sup>-06</sup>	-3,91 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	1,57 X 10 <sup>-06</sup>	-2,11 X 10 <sup>-07</sup>	1,06 X 10 <sup>-04</sup>	-4,82 X 10 <sup>-06</sup>	-4,07 X 10 <sup>-06</sup>	-3,51 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	1,30 X 10 <sup>-06</sup>	-1,94 X 10 <sup>-07</sup>	8,35 X 10 <sup>-05</sup>	7,25 X 10 <sup>-07</sup>	-3,29 X 10 <sup>-06</sup>	-2,92 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	9,61 X 10 <sup>-07</sup>	-1,38 X 10 <sup>-07</sup>	6,20 X 10 <sup>-05</sup>	4,55 X 10 <sup>-07</sup>	-2,38 X 10 <sup>-06</sup>	-2,02 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	6,07 X 10 <sup>-07</sup>	-9,23 X 10 <sup>-08</sup>	4,19 X 10 <sup>-05</sup>	4,79 X 10 <sup>-07</sup>	-1,72 X 10 <sup>-06</sup>	-1,62 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	3,67 X 10 <sup>-07</sup>	-3,93 X 10 <sup>-08</sup>	1,46 X 10 <sup>-05</sup>	7,96 X 10 <sup>-06</sup>	-5,91 X 10 <sup>-07</sup>	-7,74 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 8	2,09 X 10 <sup>-08</sup>	-4,87 X 10 <sup>-08</sup>	-2,70 X 10 <sup>-08</sup>	2,60 X 10 <sup>-08</sup>	4,14 X 10 <sup>-09</sup>	-4,61 X 10 <sup>-09</sup>

- M<sub>x</sub>

	Ensaio M <sub>x</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-4,32 X 10 <sup>-08</sup>	-1,67 X 10 <sup>-08</sup>	-1,24 X 10 <sup>-08</sup>	-5,16 X 10 <sup>-09</sup>	-4,73 X 10 <sup>-08</sup>	-2,64 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	-8,39 X 10 <sup>-08</sup>	7,19 X 10 <sup>-08</sup>	9,40 X 10 <sup>-07</sup>	4,49 X 10 <sup>-05</sup>	-7,88 X 10 <sup>-07</sup>	1,94 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	-1,25 X 10 <sup>-07</sup>	1,39 X 10 <sup>-07</sup>	1,87 X 10 <sup>-06</sup>	8,97 X 10 <sup>-05</sup>	-1,57 X 10 <sup>-06</sup>	3,95 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	-2,43 X 10 <sup>-07</sup>	2,21 X 10 <sup>-07</sup>	2,70 X 10 <sup>-06</sup>	1,34 X 10 <sup>-04</sup>	-2,22 X 10 <sup>-06</sup>	5,66 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	-3,30 X 10 <sup>-07</sup>	2,98 X 10 <sup>-07</sup>	3,65 X 10 <sup>-06</sup>	1,79 X 10 <sup>-04</sup>	-3,02 X 10 <sup>-06</sup>	7,38 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	-4,00 X 10 <sup>-07</sup>	3,69 X 10 <sup>-07</sup>	4,76 X 10 <sup>-06</sup>	2,26 X 10 <sup>-04</sup>	-3,91 X 10 <sup>-06</sup>	8,92 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	-4,29 X 10 <sup>-07</sup>	4,77 X 10 <sup>-07</sup>	5,38 X 10 <sup>-06</sup>	2,68 X 10 <sup>-04</sup>	-4,33 X 10 <sup>-06</sup>	1,02 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 8	-5,07 X 10 <sup>-07</sup>	5,31 X 10 <sup>-07</sup>	6,68 X 10 <sup>-06</sup>	3,17 X 10 <sup>-04</sup>	-5,70 X 10 <sup>-06</sup>	1,19 X 10 <sup>-06</sup>

	Ensaio M <sub>x</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-5,57 X 10 <sup>-07</sup>	5,56 X 10 <sup>-07</sup>	6,22 X 10 <sup>-06</sup>	3,13 X 10 <sup>-04</sup>	-5,04 X 10 <sup>-06</sup>	1,12 X 10 <sup>-06</sup>
Carga 2	-4,53 X 10 <sup>-07</sup>	4,80 X 10 <sup>-07</sup>	5,36 X 10 <sup>-06</sup>	2,69 X 10 <sup>-04</sup>	-4,36 X 10 <sup>-06</sup>	9,58 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	-3,57 X 10 <sup>-07</sup>	4,00 X 10 <sup>-07</sup>	4,70 X 10 <sup>-06</sup>	2,25 X 10 <sup>-04</sup>	-3,95 X 10 <sup>-06</sup>	8,14 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	-3,05 X 10 <sup>-07</sup>	3,22 X 10 <sup>-07</sup>	3,93 X 10 <sup>-06</sup>	1,81 X 10 <sup>-04</sup>	-3,20 X 10 <sup>-06</sup>	7,33 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	-2,55 X 10 <sup>-07</sup>	2,57 X 10 <sup>-07</sup>	2,98 X 10 <sup>-06</sup>	1,37 X 10 <sup>-04</sup>	-2,52 X 10 <sup>-06</sup>	4,99 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	-2,53 X 10 <sup>-07</sup>	1,53 X 10 <sup>-07</sup>	1,82 X 10 <sup>-06</sup>	8,94 X 10 <sup>-05</sup>	-1,49 X 10 <sup>-06</sup>	4,04 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	-6,58 X 10 <sup>-08</sup>	6,55 X 10 <sup>-08</sup>	1,03 X 10 <sup>-06</sup>	4,58 X 10 <sup>-05</sup>	-9,09 X 10 <sup>-07</sup>	1,93 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	-4,32 X 10 <sup>-08</sup>	-1,67 X 10 <sup>-08</sup>	-1,24 X 10 <sup>-08</sup>	-5,16 X 10 <sup>-09</sup>	-4,73 X 10 <sup>-08</sup>	-2,64 X 10 <sup>-09</sup>

- M<sub>y</sub>

	Ensaio M <sub>y</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-6,93 X 10 <sup>-09</sup>	-2,07 X 10 <sup>-08</sup>	3,27 X 10 <sup>-09</sup>	1,44 X 10 <sup>-10</sup>	-4,18 X 10 <sup>-09</sup>	-9,45 X 10 <sup>-09</sup>
Carga 2	-2,73 X 10 <sup>-07</sup>	9,12 X 10 <sup>-08</sup>	-4,62 X 10 <sup>-07</sup>	1,41 X 10 <sup>-07</sup>	2,31 X 10 <sup>-05</sup>	-8,71 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 3	-3,96 X 10 <sup>-07</sup>	3,03 X 10 <sup>-07</sup>	-1,63 X 10 <sup>-06</sup>	2,29 X 10 <sup>-07</sup>	4,21 X 10 <sup>-05</sup>	-1,64 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	-5,65 X 10 <sup>-07</sup>	4,25 X 10 <sup>-07</sup>	-2,39 X 10 <sup>-06</sup>	3,45 X 10 <sup>-07</sup>	6,44 X 10 <sup>-05</sup>	-2,86 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	-6,86 X 10 <sup>-07</sup>	7,07 X 10 <sup>-07</sup>	-3,20 X 10 <sup>-06</sup>	4,33 X 10 <sup>-07</sup>	8,53 X 10 <sup>-05</sup>	-3,98 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	-1,01 X 10 <sup>-06</sup>	7,42 X 10 <sup>-07</sup>	-4,08 X 10 <sup>-06</sup>	4,61 X 10 <sup>-07</sup>	1,06 X 10 <sup>-04</sup>	-5,05 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	-1,09 X 10 <sup>-06</sup>	1,08 X 10 <sup>-06</sup>	-4,79 X 10 <sup>-06</sup>	6,83 X 10 <sup>-07</sup>	1,28 X 10 <sup>-04</sup>	-6,06 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 8	-1,38 X 10 <sup>-06</sup>	1,08 X 10 <sup>-06</sup>	-5,54 X 10 <sup>-06</sup>	7,57 X 10 <sup>-07</sup>	1,50 X 10 <sup>-04</sup>	-7,88 X 10 <sup>-07</sup>



	Ensaio M <sub>y</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-1,39 X 10 <sup>-06</sup>	1,06 X 10 <sup>-06</sup>	-5,64 X 10 <sup>-06</sup>	7,52 X 10 <sup>-07</sup>	1,49 X 10 <sup>-04</sup>	-7,91 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 2	-1,08 X 10 <sup>-06</sup>	1,04 X 10 <sup>-06</sup>	-4,92 X 10 <sup>-06</sup>	6,85 X 10 <sup>-07</sup>	1,27 X 10 <sup>-04</sup>	-6,08 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 3	-9,81 X 10 <sup>-07</sup>	7,72 X 10 <sup>-07</sup>	-4,04 X 10 <sup>-06</sup>	4,90 X 10 <sup>-07</sup>	1,06 X 10 <sup>-04</sup>	-4,99 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 4	-6,91 X 10 <sup>-07</sup>	6,90 X 10 <sup>-07</sup>	-3,24 X 10 <sup>-06</sup>	3,91 X 10 <sup>-07</sup>	8,51 X 10 <sup>-05</sup>	-4,12 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 5	-5,28 X 10 <sup>-07</sup>	4,73 X 10 <sup>-07</sup>	-2,37 X 10 <sup>-06</sup>	3,49 X 10 <sup>-07</sup>	6,44 X 10 <sup>-05</sup>	-3,09 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 6	-3,97 X 10 <sup>-07</sup>	2,94 X 10 <sup>-07</sup>	-1,63 X 10 <sup>-06</sup>	2,08 X 10 <sup>-07</sup>	4,20 X 10 <sup>-05</sup>	-1,98 X 10 <sup>-07</sup>
Carga 7	-2,34 X 10 <sup>-07</sup>	7,32 X 10 <sup>-08</sup>	-4,96 X 10 <sup>-07</sup>	1,53 X 10 <sup>-07</sup>	2,30 X 10 <sup>-05</sup>	-9,49 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 8	-1,66 X 10 <sup>-08</sup>	-1,40 X 10 <sup>-08</sup>	9,80 X 10 <sup>-09</sup>	-8,63 X 10 <sup>-09</sup>	2,26 X 10 <sup>-10</sup>	-1,76 X 10 <sup>-08</sup>

• M<sub>z</sub>

	Ensaio M <sub>z</sub> (Carga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	-5,79 X 10 <sup>-08</sup>	3,71 X 10 <sup>-09</sup>	-2,32 X 10 <sup>-08</sup>	-2,82 X 10 <sup>-10</sup>	-4,62 X 10 <sup>-08</sup>	-2,28 X 10 <sup>-08</sup>
Carga 2	4,27 X 10 <sup>-08</sup>	7,99 X 10 <sup>-09</sup>	-2,33 X 10 <sup>-09</sup>	-7,48 X 10 <sup>-07</sup>	-1,75 X 10 <sup>-07</sup>	-4,45 X 10 <sup>-05</sup>
Carga 3	6,89 X 10 <sup>-07</sup>	9,02 X 10 <sup>-09</sup>	-3,85 X 10 <sup>-08</sup>	-1,47 X 10 <sup>-06</sup>	5,20 X 10 <sup>-07</sup>	-8,85 X 10 <sup>-05</sup>
Carga 4	6,87 X 10 <sup>-07</sup>	-1,55 X 10 <sup>-08</sup>	-7,72 X 10 <sup>-08</sup>	-2,25 X 10 <sup>-06</sup>	3,88 X 10 <sup>-07</sup>	-1,36 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 5	7,32 X 10 <sup>-07</sup>	3,24 X 10 <sup>-08</sup>	-4,15 X 10 <sup>-08</sup>	-2,97 X 10 <sup>-06</sup>	1,57 X 10 <sup>-07</sup>	-1,80 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 6	-5,12 X 10 <sup>-07</sup>	6,15 X 10 <sup>-08</sup>	-1,23 X 10 <sup>-09</sup>	-3,30 X 10 <sup>-06</sup>	-1,78 X 10 <sup>-06</sup>	-2,07 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 7	2,41 X 10 <sup>-07</sup>	7,67 X 10 <sup>-08</sup>	-2,97 X 10 <sup>-08</sup>	-4,21 X 10 <sup>-06</sup>	-9,09 X 10 <sup>-07</sup>	-2,60 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 8	1,98 X 10 <sup>-07</sup>	6,04 X 10 <sup>-08</sup>	-4,84 X 10 <sup>-08</sup>	-5,01 X 10 <sup>-06</sup>	-1,16 X 10 <sup>-06</sup>	-3,07 X 10 <sup>-04</sup>

	Ensaio M <sub>z</sub> (Descarga)					
	Extensão F <sub>x</sub>	Extensão F <sub>y</sub>	Extensão F <sub>z</sub>	Extensão M <sub>x</sub>	Extensão M <sub>y</sub>	Extensão M <sub>z</sub>
Carga 1	1,11 X 10 <sup>-07</sup>	6,37 X 10 <sup>-08</sup>	-2,55 X 10 <sup>-08</sup>	-5,05 X 10 <sup>-06</sup>	-1,24 X 10 <sup>-06</sup>	-3,07 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 2	2,27 X 10 <sup>-07</sup>	6,21 X 10 <sup>-08</sup>	-6,41 X 10 <sup>-08</sup>	-4,24 X 10 <sup>-06</sup>	-9,46 X 10 <sup>-07</sup>	-2,60 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 3	-5,42 X 10 <sup>-07</sup>	3,35 X 10 <sup>-08</sup>	-9,85 X 10 <sup>-09</sup>	-3,31 X 10 <sup>-06</sup>	-1,80 X 10 <sup>-06</sup>	-2,07 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 4	7,03 X 10 <sup>-07</sup>	2,44 X 10 <sup>-08</sup>	-2,21 X 10 <sup>-08</sup>	-2,97 X 10 <sup>-06</sup>	9,09 X 10 <sup>-08</sup>	-1,79 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 5	6,58 X 10 <sup>-07</sup>	-2,13 X 10 <sup>-08</sup>	-9,57 X 10 <sup>-08</sup>	-2,27 X 10 <sup>-06</sup>	3,59 X 10 <sup>-07</sup>	-1,36 X 10 <sup>-04</sup>
Carga 6	6,89 X 10 <sup>-07</sup>	9,02 X 10 <sup>-09</sup>	-3,85 X 10 <sup>-08</sup>	-1,47 X 10 <sup>-06</sup>	5,20 X 10 <sup>-07</sup>	-8,85 X 10 <sup>-05</sup>
Carga 7	4,71 X 10 <sup>-08</sup>	5,40 X 10 <sup>-09</sup>	-2,56 X 10 <sup>-08</sup>	-7,47 X 10 <sup>-07</sup>	-1,74 X 10 <sup>-07</sup>	-4,45 X 10 <sup>-05</sup>
Carga 8	-3,20 X 10 <sup>-08</sup>	-2,06 X 10 <sup>-08</sup>	-1,82 X 10 <sup>-08</sup>	-2,33 X 10 <sup>-08</sup>	-2,68 X 10 <sup>-08</sup>	-5,34 X 10 <sup>-08</sup>

## Anexo B

### Ensaio Teóricos:

	Medições F <sub>y</sub>					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
SF <sub>y</sub>	24,6467	24,6457	0,0010	24,6467	24,6457	0,0010
SF <sub>z</sub>	0,0002	0	0,0002	0,0002	0	0,0002
SM <sub>x</sub>	-0,0002	0	0,0002	-0,0002	0	0,0002
SM <sub>y</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
Erro F <sub>y</sub> (%):			0,0040	Erro F <sub>y</sub> (%): 0,0040		

	Medições M <sub>x</sub>					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>y</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>z</sub>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
SM <sub>x</sub>	0,7640	0,7640	0,0000	0,7640	0,7640	0,0000
SM <sub>y</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
Erro M <sub>x</sub> (%):			0,0006	Erro M <sub>x</sub> (%): 0,0006		

	Medições F <sub>x</sub> + M <sub>y</sub>					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	24,6444	24,6457	0,0012	24,6444	24,6457	0,0012
SF <sub>y</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>z</sub>	0,0099	0	0,0099	0,0099	0	0,0099
SM <sub>x</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SM <sub>y</sub>	0,7642	0,7640	0,0002	0,7642	0,7640	0,0002
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,0049	Erro F <sub>x</sub> (%): 0,0049		
Erro M <sub>y</sub> (%):			0,0297	Erro M <sub>y</sub> (%): 0,0297		

	Medições $F_x, M_y$					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	24,6446	24,6457	0,0011	24,6446	24,6457	0,0011
SF <sub>y</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
SF <sub>z</sub>	-0,1049	0	0,1049	-0,1049	0	0,1049
SM <sub>x</sub>	-0,0043	0	0,0043	-0,0043	0	0,0043
SM <sub>y</sub>	0,7650	0,7640	0,0010	0,7650	0,7640	0,0010
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000

Erro F<sub>x</sub> (%): 0,0045

Erro F<sub>x</sub> (%): 0,0045

Erro M<sub>y</sub>(%): 0,1328

Erro M<sub>y</sub>(%): 0,1328

	Medições $F_y, M_x$					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
SF <sub>y</sub>	24,6476	24,6457	0,0020	24,6476	24,6457	0,0020
SF <sub>z</sub>	0,2189	0	0,2189	0,2189	0	0,2189
SM <sub>x</sub>	-0,7645	-0,7640	0,0005	-0,7645	-0,7640	0,0005
SM <sub>y</sub>	-0,0003	0	0,0003	-0,0003	0	0,0003
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000

Erro F<sub>y</sub> (%): 0,0079

Erro F<sub>y</sub> (%): 0,0079

Erro M<sub>x</sub> (%): 0,0640

Erro M<sub>x</sub> (%): 0,0640

	Medições $F_z, M_x, M_y$					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	-0,0003	0	0,0003	-0,0003	0	0,0003
SF <sub>y</sub>	0,0001	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
SF <sub>z</sub>	-25,3899	-24,6457	0,7442	-25,3899	-24,6457	0,7442
SM <sub>x</sub>	1,7163	1,7252	0,0089	1,7163	1,7252	0,0089
SM <sub>y</sub>	1,7269	1,7252	0,0017	1,7269	1,7252	0,0017
SM <sub>z</sub>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000

Erro F<sub>z</sub> (%): 3,0196

Erro F<sub>z</sub> (%): 3,0196

Erro M<sub>x</sub> (%): 0,5174

Erro M<sub>x</sub> (%): 0,5174

Erro M<sub>y</sub> (%): 0,1009

Erro M<sub>y</sub> (%): 0,1009

	Medições $F_x, M_z$					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
<b>SF<sub>x</sub></b>	24,7117	24,6457	0,0661	24,7117	24,6457	0,0661
<b>SF<sub>y</sub></b>	0,0036	0	0,0036	0,0036	0	0,0036
<b>SF<sub>z</sub></b>	0,0077	0	0,0077	0,0077	0	0,0077
<b>SM<sub>x</sub></b>	0,0000	0	0,0000	0,0000	0	0,0000
<b>SM<sub>y</sub></b>	0,0033	0	0,0033	0,0033	0	0,0033
<b>SM<sub>z</sub></b>	1,7267	1,7252	0,0015	1,7267	1,7252	0,0015

**Erro F<sub>x</sub> (%):** 0,2680

**Erro F<sub>x</sub> (%):** 0,2680

**Erro M<sub>z</sub> (%):** 0,0887

**Erro M<sub>z</sub> (%):** 0,0887

	Medições $F_y, M_z$					
	Declives			Mínimos Quadrados		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
<b>SF<sub>x</sub></b>	0,0684	0	0,0684	0,0684	0	0,0684
<b>SF<sub>y</sub></b>	24,6483	24,6457	0,0027	24,6483	24,6457	0,0027
<b>SF<sub>z</sub></b>	0,0047	0	0,0047	0,0047	0	0,0047
<b>SM<sub>x</sub></b>	-0,0002	0	0,0002	-0,0002	0	0,0002
<b>SM<sub>y</sub></b>	0,0005	0	0,0005	0,0005	0	0,0005
<b>SM<sub>z</sub></b>	1,7272	1,7252	0,0020	1,7272	1,7252	0,0020

**Erro F<sub>y</sub> (%):** 0,0108

**Erro F<sub>y</sub> (%):** 0,0108

**Erro M<sub>z</sub> (%):** 0,1143

**Erro M<sub>z</sub> (%):** 0,1143

## Anexo C

### Ensaio Experimentais (método dos declives):

	Medições F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	14,94	14,85	0,09	24,80	24,65	0,15	34,65	34,43	0,22		
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,12	0	0,12	0,16	0	0,16		
SF <sub>z</sub>	0,21	0	0,21	0,06	0	0,06	-0,19	0	0,19		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SM <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,02	0	0,02		
SM <sub>z</sub>	-0,01	0	0,01	0,00	0	0,00	-0,04	0	0,04		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,60	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,61	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,64

	Medições F <sub>y</sub>									
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)			
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	
SF <sub>x</sub>	-0,03	0	0,03	-0,06	0	0,06	-0,08	0	0,08	
SF <sub>y</sub>	15,07	14,85	0,23	25,04	24,65	0,39	34,94	34,43	0,51	
SF <sub>z</sub>	-0,04	0	0,04	0,02	0	0,02	0,06	0	0,06	
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00	
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04	
Erro F <sub>y</sub> (%):			1.53	Erro F <sub>y</sub> (%):			1.60	Erro F <sub>y</sub> (%): 1.48		

	Medições F <sub>z</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	0,00	0	0,00		
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SF <sub>z</sub>	15,83	14,85	0,98	27,12	24,65	2,47	35,79	34,43	1,35		
SM <sub>x</sub>	-0,05	0	0,05	-0,11	0	0,11	-0,05	0	0,05		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro F <sub>z</sub> (%):			6,60	Erro F <sub>z</sub> (%):			10,03	Erro F <sub>z</sub> (%):			3,92

	Medições M <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03		
SF <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01		
SF <sub>z</sub>	-0,03	0	0,03	-0,02	0	0,02	-0,04	0	0,04		
SM <sub>x</sub>	0,94	0,93	0,00	1,86	1,86	0,01	2,78	2,80	0,02		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro M <sub>x</sub> (%):			0,39	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,42	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,73

	Medições M <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01		
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SF <sub>z</sub>	0,05	0	0,05	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	0,47	0,45	0,01	0,91	0,91	0,00	1,36	1,36	0,00		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro My (%):			2,78	Erro My (%):			0,31	Erro My (%):			0,18

	Medições $M_z$										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,03	0	0,03	0,10	0	0,10	0,08	0	0,08		
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,06	0	0,06		
SF <sub>z</sub>	0,02	0	0,02	0,05	0	0,05	0,09	0	0,09		
SM <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03		
SM <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03		
SM <sub>z</sub>	-0,97	-0,93	0,04	-1,82	-1,86	0,04	-2,66	-2,80	0,13		
Erro $M_z$ (%):			4,09	Erro $M_z$ (%):			2,28	Erro $M_z$ (%):			4,80

	Medições $F_x, M_y$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	14,96	14,85	0,11	24,83	24,65	0,18	34,69	34,43	0,26
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,12	0	0,12	0,17	0	0,17
SF <sub>z</sub>	0,58	0	0,58	-0,15	0	0,15	-0,04	0	0,04
SM <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00
SM <sub>y</sub>	0,41	0,46	0,05	0,68	0,76	0,08	1,01	1,07	0,06
SM <sub>z</sub>	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02

Erro F<sub>x</sub> (%): 0,74      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,74      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,76  
 Erro M<sub>y</sub> (%): 10,84      Erro M<sub>y</sub> (%): 10,65      Erro M<sub>y</sub> (%): 5,47

	Medições $F_y, M_x$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	-0,04	0	0,04	-0,06	0	0,06	-0,08	0	0,08
SF <sub>y</sub>	15,08	14,85	0,23	25,03	24,65	0,38	34,98	34,43	0,55
SF <sub>z</sub>	-0,13	0	0,13	-0,17	0	0,17	-0,15	0	0,15
SM <sub>x</sub>	-0,43	-0,46	0,03	-0,71	-0,76	0,05	-1,00	-1,07	0,07
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01
SM <sub>z</sub>	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04	0,06	0	0,06

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,56      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,55      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,59  
 Erro M<sub>x</sub> (%): 7,18      Erro M<sub>x</sub> (%): 7,02      Erro M<sub>x</sub> (%): 6,40

	Medições $F_x, M_z$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	15,00	14,85	0,15	24,89	24,65	0,24	34,69	34,43	0,26
SF <sub>y</sub>	0,05	0	0,05	0,09	0	0,09	0,14	0	0,14
SF <sub>z</sub>	-0,13	0	0,13	-0,23	0	0,23	-0,28	0	0,28
SM <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03	-0,05	0	0,05
SM <sub>y</sub>	-0,06	0	0,06	-0,10	0	0,10	-0,14	0	0,14
SM <sub>z</sub>	-0,78	-0,75	0,03	-1,29	-1,24	0,05	-1,80	-1,74	0,07

Erro F<sub>x</sub> (%): 1,04      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,99      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,75  
 Erro M<sub>z</sub> (%): 4,44      Erro M<sub>z</sub> (%): 4,16      Erro M<sub>z</sub> (%): 3,81

	Medições $F_y, M_z$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	-0,06	0	0,06	-0,11	0	0,11	-0,16	0	0,16
SF <sub>y</sub>	15,08	14,85	0,23	25,03	24,65	0,39	34,96	34,43	0,52
SF <sub>z</sub>	-0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,06	0	0,06
SM <sub>x</sub>	0,08	0	0,08	0,13	0	0,13	0,18	0	0,18
SM <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03
SM <sub>z</sub>	0,82	0,77	0,05	1,37	1,28	0,08	1,91	1,79	0,12

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,54

Erro M<sub>z</sub> (%): 6,30

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,57

Erro M<sub>z</sub> (%): 6,49

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,52

Erro M<sub>z</sub> (%): 6,51

	Medições $F_x, M_y$ - Base								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,93	0,98	0,05	1,86	1,96	0,11	2,77	2,94	0,17
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04
SF <sub>z</sub>	-0,24	0	0,24	-0,61	0	0,61	-0,90	0	0,90
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,47	0,45	0,01	0,92	0,91	0,01	1,38	1,36	0,02
SM <sub>z</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01

Erro F<sub>x</sub> (%): 4,90

Erro M<sub>y</sub> (%): 3,02

Erro F<sub>x</sub> (%): 5,37

Erro M<sub>y</sub> (%): 0,84

Erro F<sub>x</sub> (%): 5,93

Erro M<sub>y</sub> (%): 1,28

	Medições $F_x, M_y$ - Olhal								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,91	0,98	0,07	1,82	1,96	0,14	2,66	2,94	0,28
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,03	0	0,03
SF <sub>z</sub>	-0,26	0	0,26	-0,62	0	0,62	-0,86	0	0,86
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,51	0,49	0,02	1,00	0,98	0,02	1,52	1,47	0,04
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00

Erro F<sub>x</sub> (%): 6,96

Erro M<sub>y</sub> (%): 3,47

Erro F<sub>x</sub> (%): 6,99

Erro M<sub>y</sub> (%): 1,55

Erro F<sub>x</sub> (%): 9,58

Erro M<sub>y</sub> (%): 3,04



	Medições $F_x, F_y, M_y$ - Base								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,90	0,83	0,07	1,75	1,66	0,09	2,63	2,49	0,13
SF <sub>y</sub>	0,43	0,52	0,09	0,83	1,04	0,22	1,25	1,57	0,32
SF <sub>z</sub>	-0,37	0	0,37	-0,70	0	0,70	-1,07	0	1,07
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,46	0,45	0,01	0,94	0,91	0,03	1,40	1,36	0,04
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00

Erro F <sub>x</sub> (%):	8,51	Erro F <sub>x</sub> (%):	5,16	Erro F <sub>x</sub> (%):	5,38
Erro F <sub>y</sub> (%):	17,76	Erro F <sub>y</sub> (%):	20,67	Erro F <sub>y</sub> (%):	20,43
Erro M <sub>y</sub> (%):	2,48	Erro M <sub>y</sub> (%):	3,04	Erro M <sub>y</sub> (%):	2,91

	Medições $F_z, M_x$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SF <sub>z</sub>	-0,90	-0,98	0,09	-1,79	-1,96	0,17	-2,68	-2,94	0,26
SM <sub>x</sub>	0,48	0,47	0,01	0,96	0,93	0,03	1,44	1,40	0,04
SM <sub>y</sub>	0,05	0	0,05	0,11	0	0,11	0,16	0	0,16
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00

Erro F <sub>z</sub> (%):	8,72	Erro F <sub>z</sub> (%):	8,53	Erro F <sub>z</sub> (%):	8,97
Erro M <sub>x</sub> (%):	2,86	Erro M <sub>x</sub> (%):	3,25	Erro M <sub>x</sub> (%):	3,22

	Medições $F_z, M_y$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01
SF <sub>z</sub>	-0,86	-0,98	0,12	-1,73	-1,96	0,24	-2,58	-2,94	0,36
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SM <sub>y</sub>	0,25	0,23	0,02	0,50	0,45	0,05	0,75	0,68	0,07
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00

Erro F <sub>z</sub> (%):	11,95	Erro F <sub>z</sub> (%):	12,02	Erro F <sub>z</sub> (%):	12,22
Erro M <sub>y</sub> (%):	9,63	Erro M <sub>y</sub> (%):	10,35	Erro M <sub>y</sub> (%):	10,12

	Medições F <sub>x</sub> , F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	1,98	1,96	0,01	3,95	3,92	0,03	5,93	5,89	0,05		
SF <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03		
SF <sub>z</sub>	-0,08	0	0,08	-0,15	0	0,15	-0,23	0	0,23		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,70	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,71	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,79

	Medições F <sub>x</sub> , 2F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	2,96	2,94	0,02	5,92	5,89	0,04	8,89	8,83	0,06		
SF <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04		
SF <sub>z</sub>	-0,11	0	0,11	-0,24	0	0,24	-0,35	0	0,35		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02		
SM <sub>z</sub>	0,06	0,05	0,01	0,11	0,10	0,01	0,17	0,15	0,02		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,71	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,63	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,67
Erro M <sub>z</sub> (%):			12,78	Erro M <sub>z</sub> (%):			11,18	Erro M <sub>z</sub> (%):			12,42

	Medições F <sub>y</sub> , F <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03	-0,04	0	0,04		
SF <sub>y</sub>	1,99	1,96	0,03	3,98	3,92	0,06	5,98	5,89	0,09		
SF <sub>z</sub>	0,03	0	0,03	0,05	0	0,05	0,08	0	0,08		
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro F <sub>y</sub> (%):			1,52	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,55	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,58

	Medições F <sub>y</sub> , 2F <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,03	0	0,03	-0,05	0	0,05	-0,08	0	0,08		
SF <sub>y</sub>	2,99	2,94	0,05	5,98	5,89	0,10	8,98	8,83	0,15		
SF <sub>z</sub>	0,04	0	0,04	0,07	0	0,07	0,14	0	0,14		
SM <sub>x</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,05	0	0,05		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,06	0,05	0,01	0,12	0,10	0,01	0,18	0,15	0,02		
Erro F <sub>y</sub> (%):			1,54	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,63	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,67
Erro M <sub>z</sub> (%):			15,10	Erro M <sub>z</sub> (%):			12,72	Erro M <sub>z</sub> (%):			15,25

**Ensaaios Experimentais (método dos Mínimos Quadrados):**

	Medições F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	14,94	14,85	0,09	24,80	24,65	0,15	34,65	34,43	0,22		
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,11	0	0,11	0,16	0	0,16		
SF <sub>z</sub>	0,21	0	0,21	0,06	0	0,06	-0,19	0	0,19		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SM <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	-0,01	0	0,01	0,00	0	0,00	-0,04	0	0,04		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,60	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,61	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,64

	Medições F <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,03	0	0,03	-0,06	0	0,06	-0,08	0	0,08		
SF <sub>y</sub>	15,02	14,85	0,18	24,95	24,65	0,31	34,82	34,43	0,39		
SF <sub>z</sub>	-0,04	0	0,04	0,03	0	0,03	0,07	0	0,07		
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	-0,23	0	0,23	-0,38	0	0,38	-0,53	0	0,53		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04		
Erro F <sub>y</sub> (%):			1,18	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,25	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,13

	Medições F <sub>z</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	0,00	0	0,00		
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
SF <sub>z</sub>	15,82	14,85	0,97	27,10	24,65	2,46	35,76	34,43	1,33		
SM <sub>x</sub>	-0,04	0	0,04	-0,11	0	0,11	-0,05	0	0,05		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro F <sub>z</sub> (%):			6,54	Erro F <sub>z</sub> (%):			9,97	Erro F <sub>z</sub> (%):			3,86

	Medições M <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02		
SF <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SF <sub>z</sub>	-0,02	0	0,02	-0,01	0	0,01	-0,03	0	0,03		
SM <sub>x</sub>	0,94	0,93	0,00	1,86	1,86	0,01	2,77	2,80	0,02		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro M <sub>x</sub> (%):			0,36	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,44	Erro M <sub>x</sub> (%):			0,76

	Medições M <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SF <sub>z</sub>	0,05	0	0,05	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	0,47	0,45	0,01	0,91	0,91	0,00	1,36	1,36	0,00		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro My (%):			2,64	Erro My (%):			0,17	Erro My (%):			0,05

	Medições $M_z$										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,05	0	0,05	0,06	0	0,06	0,02	0	0,02		
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04		
SF <sub>z</sub>	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04	0,09	0	0,09		
SM <sub>x</sub>	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04	0,05	0	0,05		
SM <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>z</sub>	-0,97	-0,93	0,04	-1,82	-1,86	0,04	-2,66	-2,80	0,14		
Erro $M_z$ (%):			4,00	Erro $M_z$ (%):			2,37	Erro $M_z$ (%):			4,88

	Medições $F_x, M_y$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	14,96	14,85	0,11	24,83	24,65	0,18	34,70	34,43	0,26
SF <sub>y</sub>	0,07	0	0,07	0,12	0	0,12	0,17	0	0,17
SF <sub>z</sub>	0,58	0	0,58	-0,15	0	0,15	-0,04	0	0,04
SM <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	0,01	0	0,01	0,00	0	0,00
SM <sub>y</sub>	0,41	0,46	0,05	0,68	0,76	0,09	1,00	1,07	0,07
SM <sub>z</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02

Erro F<sub>x</sub> (%): 0,74      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,74      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,76  
 Erro M<sub>y</sub> (%): 11,58      Erro M<sub>y</sub> (%): 11,40      Erro M<sub>y</sub> (%): 6,22

	Medições $F_y, M_x$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	-0,04	0	0,04	-0,06	0	0,06	-0,07	0	0,07
SF <sub>y</sub>	15,03	14,85	0,18	24,94	24,65	0,30	34,86	34,43	0,43
SF <sub>z</sub>	-0,13	0	0,13	-0,17	0	0,17	-0,15	0	0,15
SM <sub>x</sub>	-0,43	-0,46	0,03	-0,71	-0,76	0,05	-1,00	-1,07	0,07
SM <sub>y</sub>	-0,23	0	0,23	-0,38	0	0,38	-0,54	0	0,54
SM <sub>z</sub>	0,02	0	0,02	0,04	0	0,04	0,06	0	0,06

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,22      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,20      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,24  
 Erro M<sub>x</sub> (%): 7,02      Erro M<sub>x</sub> (%): 6,84      Erro M<sub>x</sub> (%): 6,22

	Medições $F_x, M_z$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	14,99	14,85	0,14	24,86	24,65	0,22	34,65	34,43	0,22
SF <sub>y</sub>	0,04	0	0,04	0,09	0	0,09	0,13	0	0,13
SF <sub>z</sub>	-0,13	0	0,13	-0,23	0	0,23	-0,28	0	0,28
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01
SM <sub>y</sub>	-0,06	0	0,06	-0,09	0	0,09	-0,13	0	0,13
SM <sub>z</sub>	-0,78	-0,75	0,03	-1,29	-1,24	0,05	-1,80	-1,74	0,06

Erro F<sub>x</sub> (%): 0,93      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,88      Erro F<sub>x</sub> (%): 0,64  
 Erro M<sub>z</sub> (%): 4,32      Erro M<sub>z</sub> (%): 4,04      Erro M<sub>z</sub> (%): 3,69

	Medições $F_y, M_z$								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	-0,04	0	0,04	-0,08	0	0,08	-0,11	0	0,11
SF <sub>y</sub>	15,03	14,85	0,18	24,95	24,65	0,31	34,85	34,43	0,41
SF <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,07	0	0,07
SM <sub>x</sub>	0,05	0	0,05	0,09	0	0,09	0,12	0	0,12
SM <sub>y</sub>	-0,22	0	0,22	-0,37	0	0,37	-0,51	0	0,51
SM <sub>z</sub>	0,82	0,77	0,05	1,37	1,28	0,08	1,91	1,79	0,12

Erro F<sub>y</sub> (%): 1,22      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,24      Erro F<sub>y</sub> (%): 1,20

Erro M<sub>z</sub> (%): 6,21      Erro M<sub>z</sub> (%): 6,40      Erro M<sub>z</sub> (%): 6,42

	Medições $F_x, M_y$ - Base								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,93	0,98	0,05	1,86	1,96	0,10	2,77	2,94	0,17
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04
SF <sub>z</sub>	-0,24	0	0,24	-0,61	0	0,61	-0,91	0	0,91
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,47	0,45	0,01	0,91	0,91	0,01	1,38	1,36	0,01
SM <sub>z</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01

Erro F<sub>x</sub> (%): 4,83      Erro F<sub>x</sub> (%): 5,31      Erro F<sub>x</sub> (%): 5,88

Erro M<sub>y</sub> (%): 2,79      Erro M<sub>y</sub> (%): 0,62      Erro M<sub>y</sub> (%): 1,06

	Medições $F_x, M_y$ - Olhal								
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)		
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio
SF <sub>x</sub>	0,91	0,98	0,07	1,83	1,96	0,14	2,66	2,94	0,28
SF <sub>y</sub>	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03	0,03	0	0,03
SF <sub>z</sub>	-0,26	0	0,26	-0,62	0	0,62	-0,86	0	0,86
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,51	0,49	0,02	0,99	0,98	0,01	1,51	1,47	0,04
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00

Erro F<sub>x</sub> (%): 6,90      Erro F<sub>x</sub> (%): 6,93      Erro F<sub>x</sub> (%): 9,53

Erro M<sub>y</sub> (%): 3,25      Erro M<sub>y</sub> (%): 1,35      Erro M<sub>y</sub> (%): 2,85

Medições $F_x, F_y, M_y$ - Base									
1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)			
Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	
SF <sub>x</sub>	0,90	0,83	0,07	1,75	1,66	0,09	2,63	2,49	0,14
SF <sub>y</sub>	0,43	0,52	0,09	0,83	1,04	0,22	1,24	1,57	0,32
SF <sub>z</sub>	-0,37	0	0,37	-0,70	0	0,70	-1,07	0	1,07
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02
SM <sub>y</sub>	0,46	0,45	0,00	0,92	0,91	0,01	1,38	1,36	0,02
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
Erro F <sub>x</sub> (%):		8,58	Erro F <sub>x</sub> (%):		5,23	Erro F <sub>x</sub> (%):		5,44	
Erro F <sub>y</sub> (%):		17,89	Erro F <sub>y</sub> (%):		20,79	Erro F <sub>y</sub> (%):		20,55	
Erro M <sub>y</sub> (%):		0,89	Erro M <sub>y</sub> (%):		1,50	Erro M <sub>y</sub> (%):		1,37	

Medições $F_z, M_x$									
1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)			
Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SF <sub>z</sub>	-0,89	-0,98	0,09	-1,79	-1,96	0,17	-2,67	-2,94	0,27
SM <sub>x</sub>	0,48	0,47	0,01	0,96	0,93	0,03	1,44	1,40	0,04
SM <sub>y</sub>	0,05	0	0,05	0,11	0	0,11	0,16	0	0,16
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
Erro F <sub>z</sub> (%):		9,02	Erro F <sub>z</sub> (%):		8,83	Erro F <sub>z</sub> (%):		9,27	
Erro M <sub>x</sub> (%):		2,83	Erro M <sub>x</sub> (%):		3,23	Erro M <sub>x</sub> (%):		3,19	

Medições $F_z, M_y$									
1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)			
Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	
SF <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01
SF <sub>y</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01
SF <sub>z</sub>	-0,86	-0,98	0,12	-1,73	-1,96	0,24	-2,58	-2,94	0,36
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
SM <sub>y</sub>	0,25	0,23	0,02	0,50	0,45	0,05	0,75	0,68	0,07
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
Erro F <sub>z</sub> (%):		11,93	Erro F <sub>z</sub> (%):		12,00	Erro F <sub>z</sub> (%):		12,20	
Erro M <sub>y</sub> (%):		9,46	Erro M <sub>y</sub> (%):		10,17	Erro M <sub>y</sub> (%):		9,95	



	Medições F <sub>x</sub> , F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	1,98	1,96	0,01	3,95	3,92	0,03	5,93	5,89	0,05		
SF <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03		
SF <sub>z</sub>	-0,08	0	0,08	-0,15	0	0,15	-0,23	0	0,23		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,70	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,71	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,79

	Medições F <sub>x</sub> , 2F <sub>x</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	2,96	2,94	0,02	5,93	5,89	0,04	8,89	8,83	0,06		
SF <sub>y</sub>	0,01	0	0,01	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04		
SF <sub>z</sub>	-0,11	0	0,11	-0,24	0	0,24	-0,34	0	0,34		
SM <sub>x</sub>	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00		
SM <sub>y</sub>	-0,01	0	0,01	-0,02	0	0,02	-0,03	0	0,03		
SM <sub>z</sub>	0,06	0,05	0,01	0,11	0,10	0,01	0,17	0,15	0,02		
Erro F <sub>x</sub> (%):			0,75	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,67	Erro F <sub>x</sub> (%):			0,70
Erro M <sub>z</sub> (%):			12,79	Erro M <sub>z</sub> (%):			11,19	Erro M <sub>z</sub> (%):			12,42

	Medições F <sub>y</sub> , F <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	-0,02	0	0,02	-0,04	0	0,04		
SF <sub>y</sub>	1,98	1,96	0,02	3,97	3,92	0,05	5,96	5,89	0,07		
SF <sub>z</sub>	0,03	0	0,03	0,05	0	0,05	0,08	0	0,08		
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0	0,03		
SM <sub>y</sub>	-0,03	0	0,03	-0,06	0	0,06	-0,09	0	0,09		
SM <sub>z</sub>	0,00	0	0,00	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01		
Erro F <sub>y</sub> (%):			1,17	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,21	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,24

	Medições F <sub>y</sub> , 2F <sub>y</sub>										
	1º Ensaio (N)			2º Ensaio (N)			3º Ensaio (N)				
	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio	Medido	Real	Desvio		
SF <sub>x</sub>	-0,02	0	0,02	-0,05	0	0,05	-0,07	0	0,07		
SF <sub>y</sub>	2,98	2,94	0,04	5,96	5,89	0,08	8,95	8,83	0,12		
SF <sub>z</sub>	0,04	0	0,04	0,07	0	0,07	0,14	0	0,14		
SM <sub>x</sub>	0,01	0	0,01	0,03	0	0,03	0,04	0	0,04		
SM <sub>y</sub>	-0,04	0	0,04	-0,09	0	0,09	-0,13	0	0,13		
SM <sub>z</sub>	0,06	0,05	0,01	0,12	0,10	0,01	0,18	0,15	0,02		
Erro F <sub>y</sub> (%):			1,20	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,29	Erro F <sub>y</sub> (%):			1,34
Erro M <sub>z</sub> (%):			15,00	Erro M <sub>z</sub> (%):			12,62	Erro M <sub>z</sub> (%):			15,15